

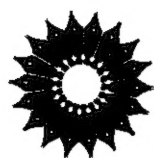


اصول مهندسی و علم مواد

لارنس ایچ. رنولڈ



ترجمہ محمدالدین اشرفی زاده، فریبا سعادت، اردشیر طهماسبی، احمد منشی



اصول مهندسی و علم مواد

لارنس اچ. ون ولك

ترجمه

فخرالدین اشرفی زاده

فربا سعادت

اردشیر طهماسبی

احمد منشی



Elements of Materials Science and Engineering
Lawrence H. Van Vlack
Fourth Edition
Addison-Wesley, 1980 .

اصول مهندسی و علم مواد

تألیف لارنس اچ. ون ولک

ترجمه دکتر فخرالدین اشرفی زاده، مهندس فریبا سعادت، دکتر اردشیر طهماسبی، دکتر احمد منشی
ویراسته مهندس زهرا سلطانپور دهکردی

مرکز نشر دانشگاهی

چاپ اول ۱۳۷۱

چاپ ششم ۱۳۸۶

تعداد ۳۰۰۰

حروفچینی: عبدی

لیتوگرافی: کوهرنگ

چاپ و صحافی: وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، سازمان چاپ و انتشارات

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاهی محفوظ است

فهرست نویسی پیش از انتشار کتابخانه ملی جمهوری اسلامی ایران

Van vlack, Lawrence H.

ون ولک، لارنس

اصول مهندسی و علم مواد / لارنس اچ. ون ولک؛ ترجمه فخرالدین اشرفی زاده ... [و دیگران]. - تهران: مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۱.

ته، ۶۹۲ ص.؛ مصور، جدول، نمودار. - (مرکز نشر دانشگاهی؛ ۶۱۸). (مواد) متالورژی؛ (۸) فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیبا.

Elements of material science and engineering.

عنوان اصلی:

ISBN 978-964-01-0618-1

چاپ ششم: ۱۳۸۶.

۱. مواد صنعتی. الف. اشرفی زاده، فخرالدین، ۱۳۳۴ - ، مترجم. ب. مرکز نشر

دانشگاهی. ج. عنوان.

۶۲۰/۱۱

الف ۹/و ۴۰۳ TA

۱۳۷۱

۱۱۷۵ - ۷۱ م

کتابخانه ملی ایران

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست

صفحه	عنوان
۱	پیشگفتار
۲	مقدمه
۱۱	۱ آشنایی با مواد: مشخصات مهم
۱۱	چشم انداز فصل
۱۲	هدف از مطالعه
۱۲	۱-۱ ساختار-خواص-انجام فرایند
۱۶	۲-۱ رفتار مکانیکی
۲۲	۳-۱ مشخصات گرمایی
۲۸	۴-۱ پاسخ به میدانهای الکتریکی
۳۱	۵-۱ ارائه خواص
۳۵	مرور و بررسی مطالب
۳۵	خلاصه
۳۶	سؤالات تشریحی
۳۸	مسائل
۴۴	۲ آشنایی با مواد: مروری بر پیوندهای شیمیایی
۴۴	چشم انداز فصل
۴۵	هدف از مطالعه
۴۵	۱-۲ اتمها و یونهای تنها
۵۱	۲-۲ نیروهای پیوندی قوی (پیوندهای اصلی)

صفحه	عنوان
۵۸	۳-۲ مولکولها
۶۴	۴-۲ نیروهای پیوندی فرعی
۶۸	۵-۲ فواصل بین اتمی
۷۵	۶-۲ عدد کوئوردیناسیون
۷۹	۷-۲ انواع مواد
۸۲	مرور و بررسی مطالب
۸۲	خواص کلی مواد
۸۳	سؤالات تشریحی
۸۵	مسائل
۹۰	۳ نظم اتمی در جامدات
۹۰	چشم انداز فصل
۹۱	هدف از مطالعه
۹۱	۱-۳ بلورینگی
۹۵	۲-۳ شبکه های مکعبی
۹۹	۳-۳ بلورهای منشور شش بر
۱۰۲	۴-۳ چندشکلی
۱۰۴	۵-۳ شکل هندسی سلول واحد
۱۱۰	۶-۳ جهات بلوری
۱۱۴	۷-۳ صفحه های بلوری
۱۲۲	۸-۳ تفرق اشعه ایکس
۱۲۶	مرور و بررسی مطالب
۱۲۶	خلاصه
۱۲۷	سؤالات تشریحی
۱۳۰	مسائل
۱۴۰	۴ بی نظمی اتمی در جامدات
۱۴۰	چشم انداز فصل
۱۴۱	هدف از مطالعه
۱۴۱	۱-۴ ناخالصیهای درون جامدات
۱۴۲	۲-۴ محلولهای جامد در فلزات
۱۴۶	۳-۴ محلولهای جامد در مواد مرکب
۱۴۹	۴-۲ عیوب در بلورها

صفحه	عنوان
۱۵۹	۴-۵ مواد غیر بلوری
۱۶۵	۴-۶ ارتعاشات اتمی
۱۷۱	۴-۷ نفوذ اتمی
۱۷۹	۴-۸ فرایندهای نفوذ
۱۸۳	مرور و بررسی مطالب
۱۸۳	خلاصه
۱۸۴	سؤالات تشریحی
۱۸۵	مسائل

۵ حرکت الکترون در جامدات

۱۹۲	چشم انداز فصل
۱۹۲	هدف از مطالعه
۱۹۳	۵-۱ حاملهای بار الکتریکی
۱۹۳	۵-۲ رسانندگی فلزی
۱۹۶	۵-۳ عایقها
۲۰۳	۵-۴ نیم رساناهای ذاتی
۲۰۴	۵-۵ نیم رساناهای خارجی
۲۱۵	۵-۶ وسایل نیم رسانا
۲۲۱	مرور و بررسی مطالب
۲۲۷	خلاصه
۲۲۷	سؤالات تشریحی
۲۲۸	مسائل
۲۲۹	

۶ فلزات تک فاز

۲۳۵	چشم انداز فصل
۲۳۵	هدف از مطالعه
۲۳۶	۶-۱ آلیاژهای تک فاز
۲۳۶	۶-۲ انجام فرایند روی آلیاژهای تک فاز
۲۴۲	۶-۳ تغییر شکل کشان
۲۴۴	۶-۴ تغییر شکل پلاستیکی در داخل تک بلورها
۲۴۹	۶-۵ خواص فلزاتی که تغییر شکل پلاستیکی یافته اند
۲۵۷	۶-۶ تبلور مجدد
۲۶۲	۶-۷ رفتار فلزات چند بلوری
۲۶۸	

صفحه	عنوان
۲۷۵	۸-۶ شکست
۲۷۹	۹-۶ زیانهای حاصل از تشعشع
۲۸۲	مرور و بررسی مطالب
۲۸۲	خلاصه
۲۸۳	سؤالات تشریحی
۲۸۵	مسائل
۲۹۲	۷ فازهای مولکولی
۲۹۲	چشم انداز فصل
۲۹۳	هدف از مطالعه
۲۹۳	۱-۷ مولکولهای بزرگ
۳۰۲	۲-۷ پلی مرهای خطی
۳۱۱	۳-۷ بی نظمیهای مولکولی
۳۱۷	۴-۷ پلی مرهای سه بعدی
۳۲۱	۵-۷ تغییر شکل مواد پلی مری
۳۲۹	۶-۷ رفتار الکتریکی پلی مرها
۳۳۴	۷-۷ پایداری پلی مرها
۳۳۹	مرور و بررسی مطالب
۳۳۹	خلاصه: ساختارهای مولکولی
۳۳۹	خلاصه: رفتار مولکولی
۳۴۰	سؤالات تشریحی
۳۴۲	مسائل
۳۴۹	۸ مواد سرامیکی
۳۴۹	چشم انداز فصل
۳۵۰	هدف از مطالعه
۳۵۰	۱-۸ فازهای سرامیکی
۳۵۳	۲-۸ بلورهای سرامیکی (AX)
۳۶۰	۳-۸ بلورهای سرامیکی A_mX_p
۳۶۳	۴-۸ ترکیبات چندتایی
۳۶۵	۵-۸ سیلیکاتها
۳۷۲	۶-۸ رفتار الکترومغناطیسی سرامیکها
۳۸۵	۷-۸ رفتار مکانیکی سرامیکها

۳۹۰	۸-۸ فرایندهای مواد سرامیکی
۳۹۷	مرور و بررسی مطالب
۳۹۷	خلاصه: ساختار سرامیکها
۳۹۸	خلاصه: خواص و رفتار سرامیکها
۳۹۸	سؤالات تشریحی
۴۰۰	مسائل

۴۰۸	۹ مواد چندفاز: نمودارهای فازی
۴۰۸	چشم انداز فصل
۴۰۹	هدف از مطالعه
۴۰۹	۱-۹ روابط کیفی فازها
۴۱۶	۲-۹ نمودارهای فازی (نمودارهای تعادلی)
۴۲۱	۳-۹ ترکیب شیمیایی فازها
۴۲۳	۴-۹ کمیت فازها
۴۲۸	۵-۹ آلیاژهای تجارتنی و سرامیکها
۴۳۵	۶-۹ فازهای سیستم آهن-کربن
۴۳۸	۷-۹ نمودار فازی $Fe-Fe_3C$
۴۴۲	۸-۹ تجزیه استتیت
۴۴۵	۹-۹ فولادهای ساده و کم آلیاژ
۴۴۹	مرور و بررسی مطالب
۴۴۹	خلاصه: نمودارهای فازی
۴۵۰	خلاصه: نمودار $Fe-Fe_3C$
۴۵۰	فهرست نمودارهای فازی
۴۵۰	سؤالات تشریحی
۴۵۲	مسائل

۴۶۱	۱۰ مواد چندفاز: میکروساختارها
۴۶۱	چشم انداز فصل
۴۶۲	هدف از مطالعه
۴۶۲	۱-۱۰ واکنشهای فازجامد
۴۷۵	۲-۱۰ میکروساختارهای چندفاز
۴۸۰	۳-۱۰ میکروساختارها: خواص مکانیکی
۴۸۸	۴-۱۰ میکروساختارها: خواص فیزیکی

صفحه	عنوان
۲۹۲	مرور و بررسی مطالب
۲۹۲	خلاصه
۲۹۳	سؤالات تشریحی
۲۹۵	مسائل
۲۹۹	۱۱ مواد چندفاز: عملیات گرمایی
۲۹۹	چشم انداز فصل
۵۰۰	هدف از مطالعه
۵۰۰	۱-۱۱ فرایندهای تابکاری
۵۰۲	۲-۱۱ فرایندهای یکنواخت کردن
۵۰۷	۳-۱۱ فرایندهای رسوب سختی
۵۱۲	۴-۱۱ سرعت واکنش $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$
۵۲۲	۵-۱۱ فرایندهای عملیات فولاد تجاری
۵۳۰	۶-۱۱ سختی پذیری
۵۴۲	مرور و بررسی مطالب
۵۴۲	سؤالات تشریحی
۵۴۴	مسائل
۵۵۲	۱۲ خوردگی فلزات
۵۵۲	چشم انداز فصل
۵۵۳	هدف از مطالعه
۵۵۳	۱-۱۲ آبرکاری برقی: عکس خوردگی
۵۵۵	۲-۱۲ جفت گالوانی (پیل گالوانی)
۵۶۲	۳-۱۲ انواع پیلهای گالوانی
۵۶۸	۴-۱۲ سرعت خوردگی
۵۷۲	۵-۱۲ کنترل خوردگی
۵۸۱	مرور و بررسی مطالب
۵۸۱	خلاصه
۵۸۲	سؤالات تشریحی
۵۸۴	مسائل
۵۸۷	۱۳ چدن، بتن، چوب و مواد چندسازه
۵۸۸	هدف از مطالعه

صفحه	عنوان
۵۸۹	۱-۱۳ چدن‌ها
۵۹۹	۲-۱۳ بتن (و محصولات مربوط به آن)
۶۱۲	۳-۱۳ چوب
۶۱۷	۴-۱۳ مواد چندسازه
۶۲۱	مرور و بررسی مطالب
۶۲۱	نتیجه
۶۲۲	سؤالات تشریحی
۶۲۳	مسائل
۶۲۸	پیوست‌ها
۶۲۹	پیوست الف. ثابت‌ها و ضرایب تبدیل
۶۳۳	پیوست ب. جدول عناصر مهم
۶۳۷	پیوست ج. خواص مواد مهم مهندسی (20°C)
۶۴۱	پیوست د. فرهنگ اصطلاحات
۶۷۱	فهرست راهنما

پیشگفتار

علم و مهندسی مواد در ۲۵ سال گذشته زمینه تحقیقات بسیاری را بدخود اختصاص داده است. محور اصلی این پیشرفت آن است که خواص و رفتار مواد به ساختار داخلی آنها بستگی نزدیک دارد. در نتیجه برای بهبود خواص باید تغییرات مناسبی در ساختار داخلی ایجاد شود. همچنین، اگر انجام عملیات یا شرایط کار، ساختار را تغییر دهد، مشخصات مواد نیز تغییر می‌کند.

در این دوره رشد و ترقی، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در روشهای آشنا کردن دانشجویان فنی دوره لیسانس با علم و مهندسی مواد به وجود آمده است. دوره‌های مقدماتی موجود به جای آنکه مانند ۱۵ تا ۲۵ سال پیش خلاصه‌ای از مطالب پیچیده شیمی و فیزیک حالت جامد باشد، بر اساس دوره‌های شیمی و فیزیک پایه دانشگاه برنامهریزی شده است. چاپهای دوم (۱۹۶۴) و سوم (۱۹۷۵) این کتاب به این روند کمک کرده است.

در حال حاضر روند دومی در آموزش مقدماتی مواد وجود دارد. در این روند، وسایل کمک آموزشی را برای دانشجو در نظر می‌گیرند به طوری که متن کتاب مقدماتی چیزی بیش از مفاهیم مشکل و رابطه‌های مفید را ارائه دهد. چاپ قبلی این کتاب با ترکیب چشم انداز فصل، تأکید بیشتر روی محاسبات به عنوان روش یادگیری، عنوانهای بحث، و بخشهای مرور و خلاصه مطالب در آخر هر بخش این روند را دنبال می‌کرد. بنیاد ملی علم که عهده‌دار ترویج و بسط روشهای آموزشی برای تدریس مهندسی و علم مواد است، در راه به وجود آوردن وسایل کمک آموزشی برای تمام عنوانهای مواد کوششهای مستمری در سطح کشور امریکا می‌دول داشته است.

چاپ جدید کتاب علم مواد و مهندسی بر اساس مزایای چاپ سوم طراحی شده است، و به بسط آنچه خود آموزی را تسهیل می‌کرده، پرداخته است. در عین حال در صدد نگهداشتن مزایای متعدد موجود در قطع و شکل کتاب درسی به عنوان مرجع مقدماتی برآمده است مثل تجمع دوره، قابلیت حمل، در دسترس افراد و قابل استفاده بودن. در چاپ قبل، آنچه بیش از همه مورد پسند دانشجویان قرار گرفت مجموعه مسائل نمونه بود. تعداد آنها در این چاپ تقریباً دو برابر شده و به ۲۵۰ می‌رسد. علاوه بر این برای تعیین موقعیت

مبحث، هدف از مطالعه نیز در چشم انداز هر فصل اضافه شده است. تقاضای اساتید مختلف سبب افزایش تعداد مسائل شده است که در حال حاضر به بیش از ۶۰۰ مسئله می‌رسد. علاوه بر این مسائل به دو بخش تقسیم شده‌اند. قسمت اول مسائل امتحانی است (که با اعداد ایرانیک مثل ۱-۶-۱۱ مشخص شده‌اند) این مسائل بسیار شبیه به مسائل نمونه یا مستقیماً مربوط به فرمولهای موجودند. هدف آنها فراهم آوردن امکانات بیشتر برای آمادگی دانشجویان قبل از رسیدن به مسائلی است که به تجزیه و تحلیل بیشتر و/یا جمع‌بندی بیشتر عنوانهای قبلی نیاز دارد. (اینها با اعداد سیاه مثل ۱-۶-۲۱ مشخص می‌شوند) و بالاخره در سؤالات تشریحی برای استفاده در کلاس تجدیدنظر و به تعداد آنها افزوده شده است، زیرا از این روش آموزش می‌توان به عنوان مکمل درسهای داده شده استفاده کرد.

طرح کلی چاپهای قبل حفظ شده است، بدین ترتیب که به خواص مهندسی جالب بیشترین توجه شده و اصول پیوندهای شیمیایی مربوط به آنچه در شیمی عمومی به آن برخورد می‌کنیم دوره شده است (فصل ۲). ویژگیهای ساختاری در سطوح اتمی و الکترونی در فصول ۳ تا ۵ مورد توجه قرار گرفته است تا مبنایی برای خواص تکفاز (الف) فلزات در فصل ۶؛ (ب) پلی‌مرها در فصل ۷؛ و (ج) سرامیکها در فصل ۸ مهیا شود. مواد چند فاز در فصول ۹ تا ۱۱، با تأکید مداوم روی نمودارهای فازی، میکروساختار، و روشهای به وجود آوردن خواص مطلوب با کنترل میکروساختار، ارائه شده‌اند. اهمیت بسیار خوردگی موجب شده است که فصل ۱۲ به طور جداگانه بدان اختصاص یابد. فصل ۱۳ به طور اساسی تغییر کرده است. در حال حاضر این فصل به چهار ماده‌ای که کاربرد بسیار دارند: چدن، بتن، مواد چند سازه، و چوب می‌پردازد. این مواد گرچه پیچیده‌اند ولی هر یک نشان‌دهنده رابطه بین ساختار و خواص‌اند. این فصل طوری نوشته شده است که مدرس می‌تواند بر حسب فرصت و نیازهای تحصیلی محلی، از یک یا چند بخش آن استفاده کند یا هیچ کدام را مورد بحث قرار ندهد.

سایر تغییرات اساسی شامل بازنویسی اثر اندازه دانه‌ها بر خواص در فصل ۶، و آشنایی با سینتیک باز بلوری توسط تابکاری و کار گرم است. انجام فرایندها در نقاط مختلف در سراسر این چاپ مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. هدف، آن نیست که از این نوشته، کتابی در مورد فرایندهای تولید، به وجود آید. بلکه هدف ما این است که به دانشجویان نشان دهیم مفهوم «ساختار-خواص» به انجام فرایند و نیز رفتار در حال کار تسری می‌یابد. «موارد تماس» با انجام فرایندها موجب می‌شود که مدرس با مثالهایی درباره انجام فرایند که خارج از تجربه اوست، آشنا شود.

در سراسر این چاپ از واحدهای SI به عنوان ابعاد اولیه استفاده شده است. مثل چاپهای قبل، بخشها و قسمتهایی مشخص شده‌اند که مدرس می‌تواند به تناسب وقت یا برای دوره‌های تکمیلی استفاده کند. عنوانهایی که با مربع توخالی (□) علامت-گذاری شده‌اند حاوی مطالبی‌اند که برای بخشهای بعد (علامت گذاری نشده) پیش نیاز محسوب نمی‌شوند.

از اینکه امکان تفکر از فرد فرد دانشجویان بی شماری که در دانشگاه میشیگان برای این چاپ جدید به نحوی کمک کرده اند، وجود ندارد، متأسفم ولی این دانشجویان باید بدانند که کمکهای آنان موجب قدردانی بسیار است. این چاپ را به دانشجویان امروز که مهندسين فردا خواهند بود تقدیم می کنم.

لارنس، اچ، ون واک

آن آر بور، میشیگان

سپتامبر ۱۹۷۹

مقدمه

مواد در خدمت بشر

موريس كوهن

همه چیز اطراف ما را مواد تشکیل می‌دهند؛ این مواد همچنان که در وجود ما قرار دارند در فرهنگ و افکار ما نیز ریشه دوانده‌اند. در حقیقت مواد آنچنان با ظهور و عروج بشر رابطهٔ نزدیک داشته است که نامهای سنگ، مفرغ، و آهن را به دورانیهای تمدن اطلاق کرده‌اند. مواد طبیعی و ساختهٔ دست بشر جزئی لازم در زندگی ما شده‌اند، چنانکه اغلب آنها را رایگان می‌دانیم و با وجود این مواد به غذا، فضای زندگی، انرژی و اطلاعات که منابع اصلی گذران زندگی بشرند نیز اطلاق می‌شود. مواد در حقیقت دستمایهٔ کار در جامعه است و نه تنها در روش زندگی بلکه در امنیت و آسایش ملتها نقش قاطعی دارد.

اما مواد چیستند؟ چطور آنها را می‌شناسیم، می‌سازیم و به کار می‌بریم؟ البته مواد بخشی از ماده موجود در عالم‌اند، ولی به طور دقیقتر اجسامی‌اند که به علت خواص خود در سازه‌ها، ماشینها، وسایل یا تولیدات کاربرد دارند. مثلاً این اجسام شامل فلزات، سرامیکها، نیم رساناها، ابررساناها، پلی‌مرها (پلاستیکها)، شیشه‌ها، دی‌الکتریکها، فیبرها، چوب، ناسه، سنگ و بسیاری مواد چندسازه می‌شوند. تولید و تغییر شکل این مواد به کالاهای ساخته شده تقریباً يك پنجم مشاغل و محصولات ناخالص ملی را در ایالات متحده در بر می‌گیرد.

از آنجا که بدن انسان را می‌توان به صورت ساختار یا ماشین یا ابزاری در نظر گرفت، می‌توان در بین طبقات مواد از غذاها، داروها، مواد حیاتی، کودها و غیره نیز نام برد. ولی در حال حاضر چنانکه معمول است شناخت این مواد را به علوم کشاورزی و زیستی واگذار می‌کنیم. به همین دلایل حتی سوختهای فسیلی، آب و هوا نیز شامل این تعریف کلی مواد می‌شوند، این مواد معمولاً در مباحث دیگر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

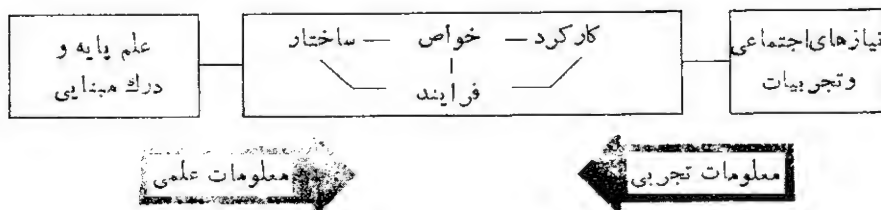
مواد در دسترس نوع بشر را می‌توان در حال جریان در چرخهٔ وسیع مواد تصور کرد، يك سیستم فراگیر گهواره-گور مواد خام توسط کان کنی، مته کاری، حفاری و جمع آوری از زمین، برداشت شده سپس به مواد حجیمی مانند شمشها، سنگهای خرد شده، مواد پتروشیمی

و الوار تبدیل می‌شود؛ به دنبال آن برای برآوردن نیازهای اجتماع به محصولات نهایی، به‌صورت مواد مهندسی مانند سیمهای برق، فولادسازه‌ها، بتن، پلاستیک‌ها، و تخته چندلای درمی‌آید. در نهایت پس از انجام وظایف محوله در خدمت بشر، این مواد در راه بازگشت خود به‌زمین به‌شکل قراضه درمی‌آیند، یا ترجیحاً دوباره وارد چرخه انجام فرایند مجدد می‌شوند و قبل از، از بین رفتن نهایی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جنبه مهم مفهوم چرخه مواد آن است که تأثیر متقابل مواد، انرژی و محیط زیست و اینکه هر سه اینها باید در طرح و برنامه‌ریزی ملی و ارزیابی تکنولوژیکی در نظر گرفته شوند، را آشکار می‌سازد. به علت کمبود روزافزون انرژی و مواد، درست در زمانی که ساکنان این سیاره توجه عمیقتری به کیفیت فضای زندگی خود نشان می‌دهند در نظر گرفتن موارد فوق به‌طور ویژه‌ای اهمیت دارد. به عنوان مثال در این مورد، اگر قراضه آلومینیم را بتوان به‌نحو مؤثری بازیابی کرد، فقط به یک سیستم انرژی لازم برای به‌دست آوردن همین مقدار آلومینیم از کانی نیاز دارد و زمین به همان اندازه از عملیات استخراج مربوط به آن کمتر صدمه می‌بیند.

در نتیجه چرخه مواد سیستمی است که منابع طبیعی و نیازهای بشر را درهم می‌پیچد. مواد به روشی فراگیر، رشته‌های ارتباطی جهان را تشکیل می‌دهند که نه تنها در این سیاره ملتها و اقتصاد آنها را بلکه جزئیترین مواد طبیعی را نیز به هم گره می‌زنند.

بنابراین روشن است که در مسیر رشد دانش بشری، از اینکه علم مواد و مهندسی جای خود را بین سایر موضوعات مورد نیاز یافته است و کوشش می‌کند که توانایی بشر را گسترش دهد جای تعجبی وجود ندارد. به‌طور ساده می‌توان گفت علم و مهندسی مواد (MSE) مشتمل است بر ایجاد و کاربرد دانش مربوط به ترکیب شیمیایی، ساختار، و تغییر شکل دادن مواد برای به‌دست آوردن خواص و کاربرد آنها. چنانکه در شکل I دیده می‌شود پیوندی وجود دارد که ساختار، خواص، فرایند، عملیات، و کاربرد مواد را به هم مربوط می‌کند. علم و مهندسی مواد به عنوان یک بند معرفت-کردار عمل می‌کند که از علوم پایه و تحقیقات بنیادی (در طرف چپ) تا نیازهای اجتماعی و تجربیات (در طرف راست) گسترده



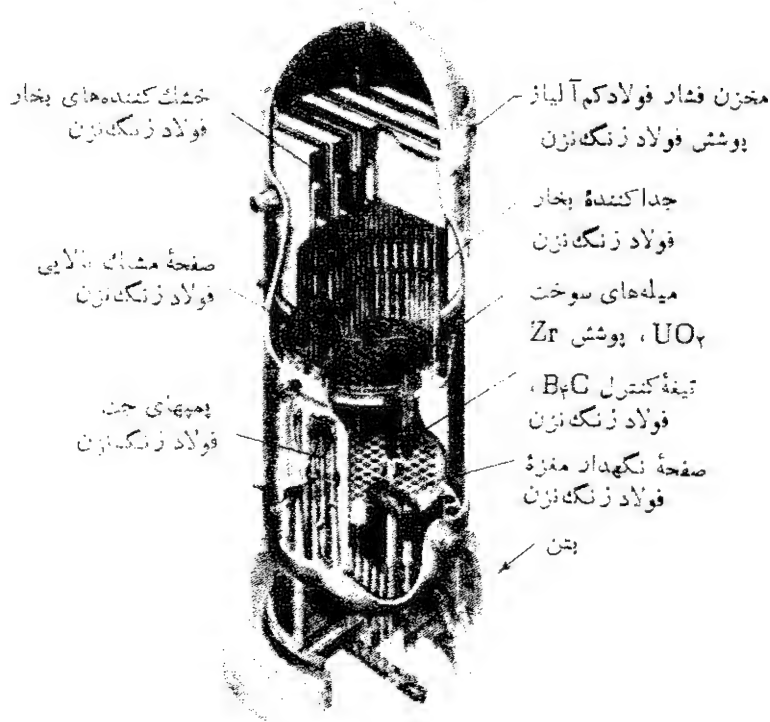
شکل I نمودار عناصر اصلی علم و مهندسی مواد در مورد دو جریان معلومات علمی و تجربی که خلاف هم‌اند.

است. جریانهای متقابل درك علمی از يك سو و اطلاعات تجربی از سوی دیگر در علم و مهندسی مواد به نحو بسیار مؤثری باهم ترکیب می شوند.

اگر بخواهیم در این طیف سهم علم مواد را مشخص کنیم، توجه خود را روی شناخت طبیعت مواد متمرکز می کنیم، این امر به نظریات و توصیفاتی منجر می شود که چگونگی ارتباط بین ساختار با ترکیب شیمیایی، خواص، و رفتار مواد را توضیح می دهد. از طرف دیگر، بخش مهندسی مواد در این طیف با سنتز و کاربرد شناخت تجربی و بنیادی سروکار دارد. و بدین وسیله به گسترش، آماده سازی، اصلاح و کاربرد مواد در برآوردن نیازهای ویژه می پردازد. آشکار است که تفاوت بین علم مواد و مهندسی مواد در درجه اول یکی از جنبه ها یا نکات مورد تأکید است؛ خطی برای تعیین حدود دو حوزه وجود ندارد و دلایل ما برای اختیار نام ترکیبی علم و مهندسی مواد با پیشرفت کار منطبقتر می نماید. در حقیقت، این کتاب درسی با استفاده از واژه علم مواد به طور کلی، برای نتیجه گیری بسیاری از جنبه های مهندسی مواد این دو را هم از نظر عنوان و هم از نظر محتوا به هم پیوند می دهد. شکلهای II و III انتخاب و کارکرد مواد را در دو کاربرد نشان می دهند که هر کدام به ارزیابیهای حرفه ای متعددی شامل کارکرد، قابل اعتماد بودن، قابل تعمیر بودن، صرفه اقتصادی و مسائل محیطی نیاز دارد. در واکنشگر هسته ای نشان داده شده، سوخت از گندلهای اورانیم اکسید در پوششی از آلیاژ زیرکونیم تشکیل شده است که در مقابل گرما مقاوم است و نوترونها را تلف نمی کند. شار نوترونی و بنابراین دمای سوخت در حین عمل، توسط وسیله ای از جنس بور کاربید که می تواند نوترونها را به طور دلخواه جذب کند، کنترل می شود ولی این وسیله باید توسط فولاد زنگ نزن در برابر خوردگی محافظت شود. بخار تولید شده در ظرف تحت فشاری در بیرون جمع آوری می شود؛ این ظرف از فولاد کم آلیاژ ساخته شده تا استحکام کافی را با هزینه معقول تأمین کند، ولی با فولاد زنگ نزن گرانیقیمت پوشش داده شده تا در برابر خوردگی محافظت شود. این تبدیل انرژی هسته ای، سیستم مواد پیچیده ای دارد که در آن مواد برگزیده باید دست به دست هم، برای کارکرد ویژه خود، عمل کنند و این، يك کاربرد شگفت انگیز مواد در تولید انرژی است. برعکس تقریباً نیمی از انرژی مصرفی توسط صنایع سازنده در ایالات متحده صرف تولید و شکل دادن مواد می شود.

سیستم دیگر مواد که نقش مواد در ساختن مسکن را نشان می دهد در شکل III نمایش داده شده است. اگرچه ممکن است خانه سازی از نظر علم مواد و مهندسی موردی پیش پا افتاده تر از واکنشگر هسته ای باشد، ولی با وجود این مثالی که آورده ایم یکی از موارد استثنایی است؛ زیرا این خانه تقریباً به طور کامل از مواد بازیابی شده ساخته شده است؛ و بدین وسیله منابع زمینی و انرژی حفظ شده در حالی که ضررهای محیطی کاهش یافته است، برای ساخت قطعات فلزی، شیشه، بتن، توفاق سقف، کاغذ دیواری، عایق بندی، و محصولات چوبی از مواد بازیابی شده، لازم است از سطح بالای رشد و تکنولوژی مواد برخوردار بود تا قیمت و همچنین کیفیت آن با مواد معمول قابل رقابت باشد.

واکنشگر جوش آورنده آب

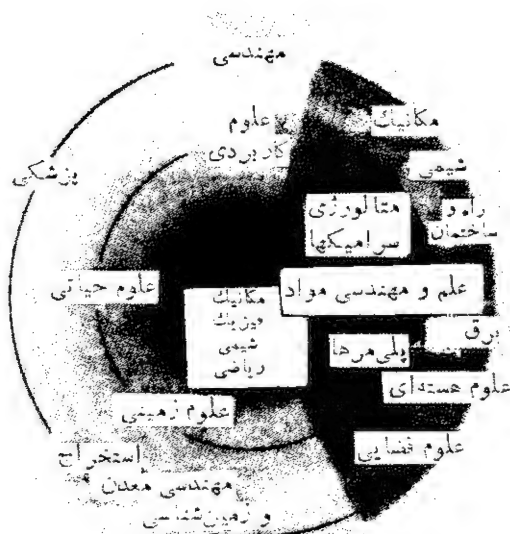


شکل II سیستم مواد برای تبدیل انرژی. طراحی حسن نوع مجتمع مثل واکنشگر هسته‌ای آب جوش به شرکت ویژه انواع مختلف مواد نیاز دارد. نقش، خواص و محدودیتهای هر ماده باید توسط دانشور یا مهندسی که می‌خواهد سیستم کارآمد، ایمن، با صرفه، و از نظر محیطی قابل اعتمادی طراحی کند، شناخته شود.

بنا بر این می‌بینیم که علم و مهندسی مواد موضوع وسیعی است که از یک طرف به دنیای میکروسکوپی آنها و الکترون‌ها مربوط می‌شود و از طرف دیگر حالت جامد جسم را به دنیای ماکروسکوپی عمل و کاربرد مواد برای مقابله با مسائل اجتماعی مربوط می‌کند. نمودار دایره‌ای شکل IV بخش وسیعی از دانش بشری را از علوم پایه در مرکز، تا علوم کاربردی در دایره وسطی، تا زمینه‌های مختلف مهندسی در حاشیه خارجی نشان می‌دهد. در مرکز فیزیک و شیمی را و در جناح آنها ریاضی و مکانیک را نشان داده‌ایم؛ با حرکت روی شعاع دایره به طرف خارج از مشخصه‌های کاربردی مختلفی می‌گذریم. قسمتی از این شکل که تحت عنوان علم و مهندسی مواد دیده می‌شود قطاع سایه‌زده شده‌ای در سمت راست

تصویر است که می‌توان آن را با قطعه‌های دیگر که نشان‌دهنده علوم زیستی و علوم زمینی‌اند مقایسه کرد. علم و مهندسی مواد به مفهوم وسیع‌تر آن است که نظامی مشتمل بر بعضی از نظام‌ها (مثل متالورژی و سرامیک) و بعضی نظام‌های فرعی (مثل فیزیک حالت جامد و شیمی پلی‌مرها) است (ولی جانشین آنها نمی‌شود) و همچنین با چندین نظام مهندسی همپوشانی دارد.

البته دانشوران و مهندسان بسیاری هستند که متخصص مواد، متالورژی، سرامیک و شیمی پلی‌مرند و کاملاً در زمینه علم مواد و مهندسی کار می‌کنند. نکته دیگری که دارای همین اهمیت است، این است که آمار دولتی پس از تجزیه و تحلیل نشان می‌دهند که یک ساعت از هر شش ساعت کار رسمی که توسط سایر مهندسان انجام می‌شود به مواد و کاربرد آنها مربوط است. نسبت زمانی برای شیمی‌دانان و فیزیک‌دانان حتی بیشتر از این است. در نتیجه معادل نیم‌میلیون از تقریباً دو میلیون دانشور و مهندس در این کشور در این بخش اصلی از محصولات ملی و آسایش ملی ما شریک‌اند.



شکل IV. علم و مهندسی مواد این نمودار از اصول مقدماتی علمی فیزیک و شیمی ترسیم شده تا ترکیب شیمیایی و ساختار مواد را به خواص و رفتار کاربردی که برای مهندسان اهمیت دارد مربوط سازد. بیش از یک چهارم فعالیت‌های فنی ملی ما صرف گسترش و تکنولوژی مواد می‌شود. این فعالیت‌ها در زمینه علوم فیزیکی و تمام شاخه‌های مهندسی انجام می‌شود.

بدینسان علم و مهندسی مواد چهارچوبی را تشکیل می‌دهد که در آن افراد متخصص از بسیاری رشته‌ها به‌طور خلاق کار می‌کنند تا فرایندهای طبیعی را مورد بررسی دقیق قرار دهند و همچنین دانش خود را در زمینه بر آوردن نیازهای بشری گسترش دهند.

موريس كوهن

كمبريج، ماساچوست

سپتامبر ۱۹۷۹

آشنایی با مواد: مشخصات مهم

چشم انداز فصل

مهندس، مواد و انرژی را به محصولات قابل استفاده تبدیل می‌کند. او برای انجام این کار می‌کوشد موادی را با خواص بهینه برگزیند. در این فصل با تعدادی از خواص عامی که باید مورد نظر قرار گیرد آشنا می‌شوید. با خواص دیگر بعداً آشنا خواهید شد.

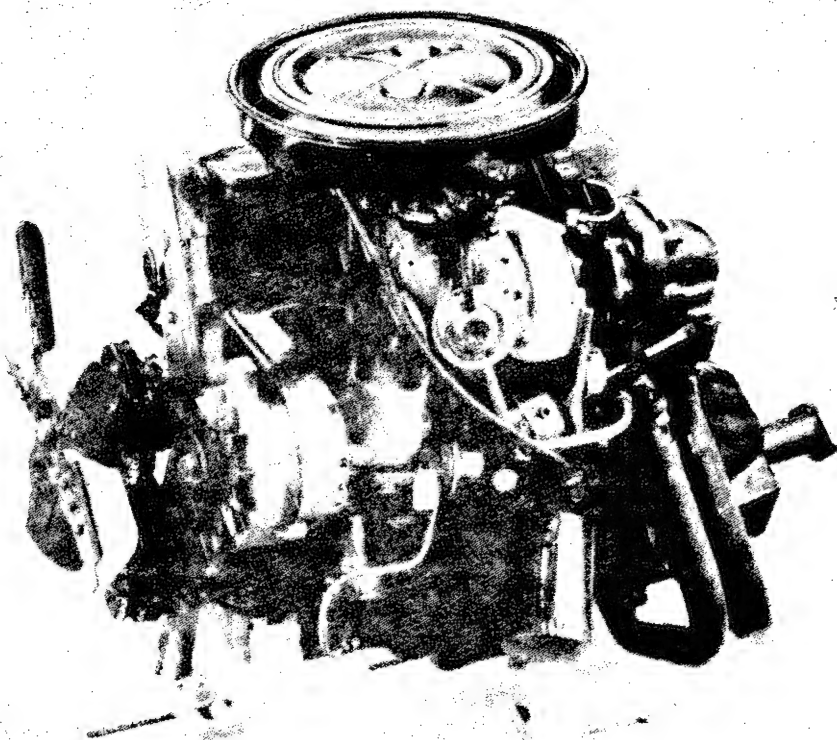
موضوع این کتاب، بستگی خواص و رفتار مواد به ساختار داخلی آنهاست. خواص مکانیکی، گرمایی، و الکتریکی و مشخصاتی که در فصل ۱ معرفی می‌شوند اساس تشریح ارتباط ساختار و خواص اند که در فصل‌های بعدی به آنها می‌پردازیم. مطالبی نیز در مورد ارائه داده‌ها، تغییرات آنها و دقتی که باید در محاسبات منظور شود، به طور خلاصه در فصل ۱ آمده است.

هدف از مطالعه

۱. آشنایی با این مفهوم که مواد دارای ساختار داخلی اند. (جزئیات مختلف ساختار داخلی موضوع اصلی فصلهای آینده خواهد بود.)
۲. آشنایی با واژه‌ها و مفاهیم برگزیده‌ای که الف) بعداً در این کتاب و ب) در شغل آینده خود در حین ارتباط با سایر مهندسان با آنها برخورد خواهید کرد.
۳. آموختن ارتباط بین خواص مکانیکی مختلف مواد، به ویژه آنهایی که در جدول ۱-۲-۱ وجود دارند.
۴. مرور درسهای قبلی فیزیک در زمینه خواص کلیدر گرمایی و الکتریکی، و تعمیم مفهوم رسانندگی به حاملهای بار.
۵. مدلل کردن معلومات شما در مورد خواص با استفاده از محاسبات ساده. (مسائل موجود در پایان هر فصل بدین منظور آمده‌اند.)
۶. مرور مفاهیم میانگین، میانه، وانحراف استاندارد و ارائه جوابها با تعداد مناسب ارقام با معنی.

۱-۱ ساختار-خواص-انجام فرایند

هر دانشور علوم کار بردی و هر مهندس از جمله مهندس مکانیک، عمران، و برق اساساً با مواد مصرفی در دسترس سروکار دارد. محصول کار او هر چه باشد از پل، کامپیوتر، سفینه فضایی، دستگاه راه‌انداز قلب، واکنشگر هسته‌ای گرفته تا سیستم اتوماتیک اتومبیل باید شناخت دقیقی از خواص و مشخصات رفتاری موادی که به کار می‌برد داشته باشد. لحظه‌ای تنوع موادی را که در ساخت اتومبیل به کار می‌رود در نظر بگیرید، آهن، فولاد، شیشه، پلاستیک، و لاستیک شمار اندکی از آنهاست (شکل ۱-۱-۱). فولاد به تنهایی در حدود دوهزار نوع و شکل مختلف دارد. انتخاب ماده برای قطعه‌ای معین بر چه اساسی است؟ طراح برای انتخاب ماده باید خواصی مانند استحکام، رسانندگی الکتریکی یا گرمایی و چگالی را در نظر داشته باشد. علاوه بر این باید چگونگی رفتار ماده را در خلال تولید و مصرف که شکل پذیری، قابلیت ماشینکاری، پایداری الکتریکی، دوام شیمیایی، و خواص تشعشعی اهمیت دارند و قیمت و در دسترس بودن را نیز مد نظر قرار دهد. مثلاً فولادی که در چرخ دنده‌های انتقال نیروی اتومبیل به کار می‌رود، باید در موقع تولید به آسانی ماشینکاری شود، ولی پس از آن باید به حد کافی چقرمه شود تا بتواند در مقابل کار و نیروی بسیار پایداری نشان دهد. سپر اتومبیل باید از فلزی ساخته شود که به آسانی شکل گیرد ولی در مقابل تغییر شکل ناشی از ضربه مقاوم باشد. سیمهای الکتریکی باید در برابر دمای بسیار زیاد دوام داشته باشند، و در نیمرساناها باید نسبت آمپر به ولتاژ مدتی طولانی ثابت بماند.

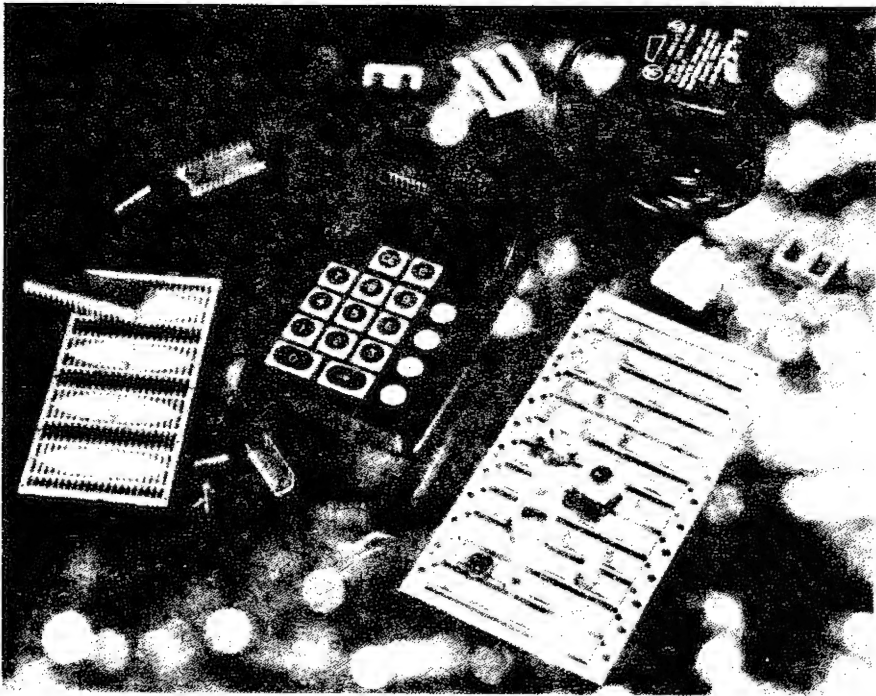


شکل ۱-۱-۱ در این موتور اتومبیل صدها نوع ماده به کار رفته است. (از خواننده می‌خواهیم موادی را که واضح‌اند مشخص کند.) مهندس طراح، هر ماده را براساس قابلیت ساخت، خواص، رفتار در حین کار، قیمت، و در دسترس بودن آن انتخاب می‌کند. در دهه آینده همگام با اهمیت یافتن محدودیتهای وزنی، مشکلاتر بودن تهیه مواد خام، و طراحی مجدد موتور برای تبدیل انرژی با بازده بیشتر و بهبود بخشیدن به مواد ضرورت می‌یابد.

بسیاری از طرحهای پیشرفته به تولید مواد کاملاً جدید بستگی دارند. مثلاً با موادی که تا چند سال پیش در دسترس بود ساخت ترانزیستور ممکن نبود. برای توسعه لیزرها به انواع جدیدتری از بلور و شیشه نیاز بود. با وجود پیشرفتهای زیادی که در طراحی موتورهای با توربین گازی حاصل شده، برای ساختن پره‌های این نوع توربینها هنوز در پی ماده ارزان قیمتی هستیم که بتواند دماهای بالا را تحمل کند.

ساختار داخلی و خواص. چون عملاً هیچ مهندس یا دانشورزی نمی‌تواند شناخت دقیقی از هزاران ماده موجود و همچنین کشفیات جدید داشته باشد، باید از اصول اساسی حاکم بر خواص تمام مواد شناخت کافی داشته باشد. اصلی که برای مهندسان و دانشوران اهمیت

فر اوان دارد این است کسه خواص يك ماده از ساختار داخلی آن ناشی می شود. درست مثل این است که بگوئیم کار هر دستگاه تلویزیون با هر محصول الکترونیکی دیگر (شکل ۱-۲) به اجزاء و قطعات و مدارهای داخل آن دستگاه بستگی دارد. هر کسی می تواند با کمک کلید قطع و وصل، تلویزیون را روشن کند. ولی تکمیل الکترونیک اگر بخواهد آن را درست تعمیر کند باید مدارهای داخلی آن را بشناسد و فیزیکدان یا مهندس برق برای طرح یا بهبود بخشیدن به محصول نهایی باید مشخصات هر کدام از قطعات مدارهای داخلی تلویزیون را بداند.



شکل ۱-۲ ماشین حساب الکترونیکی. چگونگی کار ماشین حساب به ترتیب اجزای مدار داخلی آن بستگی دارد. به همین ترتیب رفتار مواد به ساختار اجزای داخلی مربوط می شود. خواهیم دید که این ترتیب شامل ساختار الکترونی اطراف اتمها، آرایش اتمی، ساختار بلورها و میکرو ساختار بلورهای مجاور است. مهندسان و دانشوران می توانند با انتخاب این ساختارهای داخلی و بهبود بخشیدن به آنها نیازهای طراحی را برطرف سازند؛ درست همان طور که طراح مدار اجزای الکترونیکی آن را اصلاح می کند. برای انجام هوشمندانه این کار، باید ارتباط بین ساختار و خواص مواد را بدانیم.

ساختار داخلی مواد شامل آنها و چگونگی ارتباط آنها با اتمهای همسایه در بلورها، مولکولها و میکروساختار آنها می‌شود. در فصلهای بعد به این ساختارها توجه زیادی خواهیم کرد، زیرا هر کسی که با مسائل فنی سروکار داشته باشد، برای تولید و مصرف مواد باید این ساختارها را دقیقاً درک کند، درست مثل اینکه هر مهندس مکانیکی که می‌خواهد برای نیازهای ده سال بعد اتومبیلی طراحی کند، یا طرحهای موجود را توسعه دهد، باید عملکرد موتور احتراق داخلی را بداند.

انجام فرایند و خواص. مواد باید فرایندهایی را پشت سر گذارند تا مشخصاتی را که مهندس برای محصول مورد طراحی در نظر دارد، به دست آورند. معمولیترین مراحل فرایند، مثل ماشینکاری یا پتکاری، به سادگی شکل مواد را تغییر می‌دهند. البته خواص در نتیجه انجام فرایند نقش مهمی دارند. مواد فوق‌العاده سخت فوراً تیغه‌های ابزار برش را خراب می‌کنند و مواد نرم مانند سرب ممکن است موجب «کج رفتن» تیغه‌های اده، چرخهای سنگ‌زنی و سایر ابزار شوند. به همین ترتیب مواد محکم، به ویژه اگر انعطاف‌پذیر نباشند یعنی سرد باشند، تابع تغییر شکل پلاستیکی نیستند، مثلاً تولید ورق فلزی لازم برای سپر اتومبیلها با ماده‌ای به جز نرمترین فولاد فوق‌العاده گران تمام می‌شود.

فرایندهایی که انجام می‌شود معمولاً فراتر از تغییر دادن شکل مواد یا ماشینکاری یا با تغییر شکل پلاستیکی است. فرایند ساخت، اغلب خواص ماده را تغییر می‌دهد. مثلاً سیم اگر برای کاهش قطر از میان قالب کشیده شود، محکم و سخت می‌شود. به‌طور کلی این سخت شدن در سیم مسی که به عنوان رسانای برق مصرف می‌شود مطلوب نیست؛ برعکس در مورد سیم فولادی که در لاستیک تقویت شده با سیمهای فولادی به کار می‌رود، مهندس روی این استحکام به وجود آمده در حین انجام فرایند حساب می‌کند. خواه ناخواه هر جا که فرایند ساخت، ساختار داخلی ماده را تغییر دهد باید انتظار تغییر خواص را داشت. هنگامی که ماده تغییر شکل می‌دهد ساختار داخلی آن تغییر می‌کند؛ و بنابراین تغییری در خواص به وجود می‌آید.

فرایندهای گرمایی نیز ممکن است ساختار داخلی مواد را تحت تأثیر قرار دهند. این فرایندها شامل تابکاری، آب دادن مواد از دماهای بالا، و چند عملیات گرمایی دیگر است. منظور ما درک ماهیت تغییرات ساختاری است، تا به عنوان مهندس بتوانیم مراحل مناسب فرایند را مشخص کنیم.

رفتار ماده در حین کار. ماده‌ای که به صورت محصول نهایی درمی‌آید دارای مجموعه‌ای از خواص نظیر استحکام، سختی، رسانندگی، چگالی، رنگ و غیره است که طبق نیاز انتخاب می‌شود. ماده این خواص را همیشه در خود دارد. مشروط بر اینکه تغییری در ساختار داخلی آن به وجود نیاید. ولی اگر محصول در حین کار با شرایطی روبرو شود که ساختار داخلی را تغییر دهد، مطابق با آن باید انتظار تغییر در خواص و رفتار ماده را داشته باشیم.

این امر نشان می‌دهد که چرا لاستیک در معرض نور و هوا به تدریج سخت می‌شود؛ چرا در بسیاری از قسمتهای هواپیمای مافوق صوت نمی‌توان آلومینیم به کار برد؛ چرا فلز تحت بار چرخدای خسته می‌شود؛ چرا مته‌ای از جنس فولاد معمولی نمی‌تواند به سرعت مته‌ای از فولاد تندبر سوراخ کند؛ چرا آهنربا قطبی بودن خود را در میدان 3000 گرم از دست می‌دهد و چرا نیم رسانا بر اثر تشعشع هسته‌ای ممکن است صدمه ببیند. این موارد پایان ندارد. در نتیجه مهندسان باید علاوه بر خواسته اولیه به شرایط کاری که ساختار داخلی و در نتیجه خواص مواد را تغییر می‌دهند نیز توجه کنند.

سیر مطالب این کتاب، طبق «ساختار» طرح شده برای این کتاب فصل اول در بساطه برخی اصلاحات و اندازه گیری خواص مواد بحث می‌کند. سپس در فصل ۲ آن دسته از مبانی علم شیمی و فیزیک مقدماتی را که مستقیماً به رابطه بین ساختار و خواص مربوط می‌شود مرور می‌کنیم. از فصل سوم به بعد به ترتیب صور مختلف ساختاری را که خواص به آنها بستگی دارد (از اتم گرفته تا مواد چند سازه) بررسی خواهیم کرد. نقش فرایندها و عوامل مربوط به کار برد را اغلب در نظر خواهیم گرفت، زیرا همیشه در تصمیم گیری در مورد طرح باید مورد توجه قرار گیرند.

مسائل نمونه و مسائل آخر فصل به دو منظور به کار رفته‌اند: ۱) تشریح اصول مربوط به ساختار و یا خواص؛ ۲) افزایش توانایی حل مسئله که برای مهندسان و کارشناسان علوم کار بردی بسیار اهمیت دارد.

۲-۱ رفتار مکانیکی

اگر نیرویی بر ماده اعمال شود، تغییر شکلی در آن صورت می‌گیرد. مقدار تغییر شکل در واحد طول را کرنش، e ، و مقدار نیرو بر واحد سطح را تنش، s ، می‌نامند. در حین تغییر شکل، ماده انرژی جذب می‌کند زیرا در خلال تغییر شکل نیرویی اعمال می‌شود. استحکام، مقدار تنش لازم برای شکست ماده را نشان می‌دهد. انعطاف پذیری مقدار کرنش دائمی قبل از شکست را مشخص می‌کند، در حالی که چقرمگی به مقدار انرژی جذب شده توسط ماده در خلال شکست گفته می‌شود (جدول ۱-۲-۱).

مهندس طراح مشخصات مختلفی برای این خواص مکانیکی تعیین می‌کند. برای مثال در فولاد خط لوله، عموماً استحکام زیاد را توصیه می‌کنند. همچنین برای افزایش چقرمگی ممکن است انعطاف پذیری زیاد توصیه شود. از آنجا که این دو عامل (استحکام و انعطاف پذیری) با هم سازگار نیستند، مهندسان اغلب باید حالت بینابین این دو را در نظر گیرند تا مشخصات بهینه را به دست آورند. استحکام و انعطاف پذیری نیز به راههای مختلفی تعریف می‌شوند. مثلاً آیا وقتی میله‌ای فولادی خم می‌شود دیگر قابل استفاده نیست یا میله باید واقعاً بشکند تا قابل استفاده نباشد؟

البته جواب این سؤال به نیاز طرح مهندسی بستگی دارد ولی این تضاد، سودمندی تعریف حداقل دو استحکام را به ما نشان می‌دهد: یکی برای تسلیم شدن اولیه و دیگری برای پیشینه‌بازی که ماده می‌تواند تحمل کند. به این منظور در اینجا نمودارهای تنش-کرنش (σ - ϵ) شکل ۱-۲-۱ را بررسی می‌کنیم و در خلال آن به ترتیب تغییر شکل، استحکام، سختی و چقرمگی را مدنظر قرار خواهیم داد.

تغییر شکل. کرنش اولیه اصولاً با تنش متناسب است، به علاوه این کرنش برگشت پذیر است. پس از برداشتن تنش، کرنش نیز از بین می‌رود. مدول کشسانی (مدول یانگ) برابر نسبت تنش σ به این کرنش برگشت پذیر ϵ است

$$E = \sigma / \epsilon \quad (1-2-1)$$

مطابق جدول ۱-۲-۱، واحد مدول یانگ E در سیستم متریک، پاسکال (یا معمولیتر از آن مگا پاسکال MPa) است. در پیوست (ج) مقادیر مدول یانگ برای مواد برگزیده‌ای آورده شده است. در فصل ۲ خواهیم دید که مدول کشسانی (مدول یانگ) مقیاسی از نیروهای پیوند بین اتمی است. مهندس باید کاملاً این خواص را بشناسد زیرا مستقیماً به‌صلاحت محصول مهندسی حاصل مربوط است.

در تنشهای بالاتر علاوه بر کرنش کشسان، بین اتمهای داخل ماده تغییر مکانی دائمی نیز رخ می‌دهد. اگر تنش اعمال شده را برداریم، این کرنش دائمی قابل برگشت نیست؛ این کرنش را کرنش پلاستیکی می‌نامیم. وجود این نوع کرنش در خلال انجام فرایندهایی روی مواد (مثلاً در نورد کردن ورقهای آلومینیم ابتدا به ورقهای نازکتر و سپس به ورقهای خیلی نازک) ضروری است. کاربرد این محصولات معمولاً طوری طراحی می‌شود که از تغییر شکل دائمی محصول پرهیز شود و بنابراین تنشهایی که در طراحی در نظر گرفته می‌شوند باید در محدوده کشسان (خطی) شکل ۱-۲-۱ (ب) و (ج) باشند.

کرنش کشسان که تنها حالت تغییر شکل زیر استحکام تسلیم است در تنشهای بالاتر که کرنش پلاستیکی به وجود می‌آورند نیز به افزایش خود ادامه می‌دهد. هنگامی که ماده می‌شکند (یا بار به‌سادگی از روی آن برداشته می‌شود) کرنش کشسان از بین می‌رود ولی کرنش پلاستیکی از بین نمی‌رود.

انعطاف پذیری، یا کرنش پلاستیکی لازم برای شکست، ϵ_f را می‌توان به صورت درصد ازدیاد طول بیان کرد. انعطاف پذیری نیز همانند کرنش بدون واحد و به صورت $(L_f - L_0) / L_0$ یا $\Delta L / L_0$ است. اما از شکل ۱-۲-۱ مشخص می‌شود که چون تغییر طول معمولاً در ناحیه گلوویی نمونه متمرکز می‌شود، بنابراین مقدار ازدیاد طول به سنجۀ طول بستگی دارد. هر جا که بخواهیم ازدیاد طول را گزارش دهیم باید سنجۀ طول را مشخص کنیم.

مقیاس دوم انعطاف پذیری، کاهش سطح مقطع $(A_0 - A_f) / A_0$ در نقطۀ شکست

جدول ۱-۲-۱ خواص مکانیکی مواد

خواص	علامت	تعریف (یا توضیحات)	واحد معمول SI
تنش	s	$\frac{\text{نیرو}}{\text{سطح واحد}}$	پاسکال (N^*/m^2)
کرنش	e	تغییر شکل نسبی ($\Delta L/L$)	—
مدول کشسانی (یا ننگ)	E	$\frac{\text{تنش}}{\text{کرنش کشسان}}$	پاسکال
استحکام		تنش در لحظه گسیختگی	
استحکام تسلیم	S_y	مقاومت در مقابل تغییر شکل پلاستیکی اولیه	پاسکال
استحکام کششی	S_t	پیشینه استحکام (بر اساس ابعاد اولیه)	پاسکال
انعطاف پذیری		کرنش پلاستیکی در لحظه گسیختگی	—
ازدیاد طول	e_f	$(L_f - L_o)/L_o$	§
کاهش سطح مقطع	R از A	$(A_o - A_f)/A_o$	§
چقرمگی		انرژی لازم برای گسیختگی توسط شکست	ژول
سختی**		مقاومت در مقابل فرورفتگی پلاستیکی	واحدهای مختلف

* باری به جرم یک کیلوگرم تحت تأثیر شتاب ثقل نیروی F را ایجاد می کند که برابر ۹۸ نیوتن است.

** برای تعیین مقدار سختی معمولاً سه روش مختلف به کار می رود.

برینل (BHN): در این روش از سمبه بزرگی استفاده می شود، و سختی به قطر

سمبه (۱ تا ۴ میلی متر) بستگی دارد.

راکول (R): در این روش از سمبه کوچکی استفاده می شود، و سختی به عمق

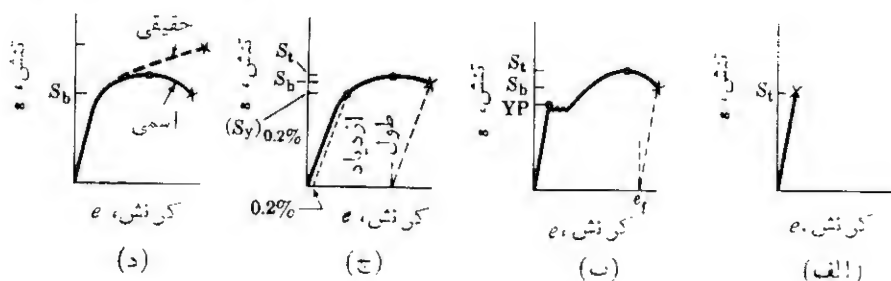
حفرة ایجاد شده بستگی دارد. بر اساس اندازه سمبه و بار اعمال

شده چند مقیاس مختلف راکول حاصل می شود.

ویکرتز (DPH): در این روش منشور الماسی کوچکی به کار می رود، و می توان

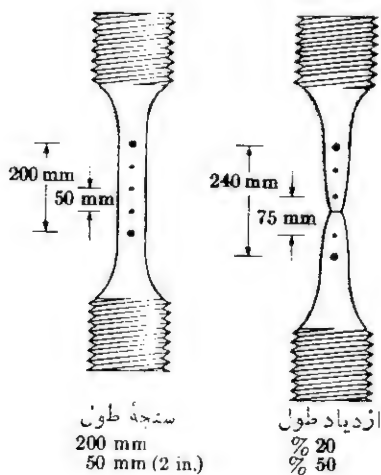
از بار بسیار سبکی برای اندازه گیری سختی در زیر میکروسکوپ،

استفاده کرد.

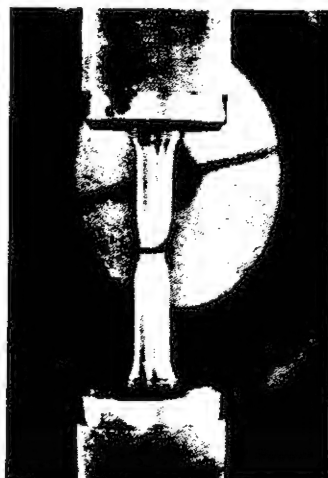


شکل ۱-۲-۱ نمودارهای تنش - کرنش. (الف) ماده انعطاف پذیر بدون هیچ گونه تغییر شکل پلاستیکی (مثلاً چدن)؛ (ب) ماده انعطاف پذیر دارای نقطه تسلیم (مثلاً فولاد کم کربن)؛ (ج) ماده انعطاف پذیر بدون نقطه تسلیم مشخص (مثلاً آلومینیوم)؛ (د) منحنی تنش - کرنش حقیقی در مقایسه با منحنی تنش - کرنش اسمی. S_b = استحکام شکست؛ S_y = استحکام کششی؛ e_f = ازدیاد طول (کرنش قبل از شکست)؛ X = شکست؛ $Y.P.$ = نقطه تسلیم.

است. سطح مقطع مواد خیلی انعطاف پذیر قبل از شکستن مقدار زیادی کاهش می یابد. ازدیاد طول اندازه «کشش» پلاستیکی است. در صورتی که کاهش سطح مقطع اندازه «انقباض» پلاستیکی است. بسیاری از مهندسان ترجیح می دهند کاهش سطح مقطع را به عنوان



(ب)



(الف)

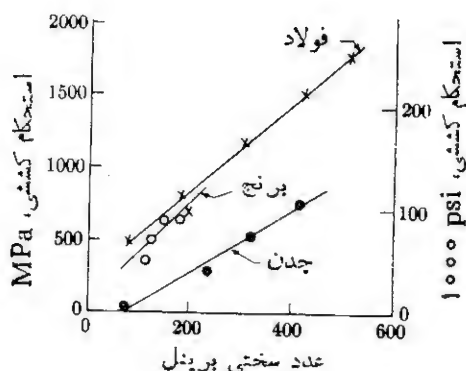
شکل ۱-۲-۱ آزمایش کششی. (الف) آزمایش کامل روی نمونه مدور؛ (ب) ازدیاد طول بر حسب سنجه طول. چون تغییر شکل نهایی متمرکز است، بدون تعیین سنجه طول، مقدار ازدیاد طول بی معنی است. برای آزمایشهای معمولی، از سنجه طول ۵۰ میلی متری استفاده می شود.

مقیاس انعطاف پذیری به کار برند، زیرا به سنجۀ طول نیاز ندارد و برای تعیین کرنش حقیقی در نقطۀ شکست نیز می توان آن را به کار برد. (توضیح بعد از مثال ۱-۲-۴ را ببینید.) بین ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع نمی توان رابطۀ دقیقی برقرار کرد، زیرا تغییر شکل پلاستیکی ممکن است به شدت موضعی باشد. البته مواد بسیار انعطاف پذیر تغییر طول و کاهش سطح مقطع زیادی خواهند داشت و مقدار این دو در مواد انعطاف ناپذیر نزدیک به صفر خواهد بود.

استحکام (وسختی). مقاومت هر ماده را در مقابل تغییر شکل پلاستیکی، استحکام تسلیم، S_y ، می نامند که از تقسیم نیرو در لحظۀ شروع تسلیم به سطح مقطع آن به دست می آید، در موادی مانند بعضی فولادهای نرمتر، استحکام تسلیم را می توان به صورت نقطۀ تسلیم مشخصی نشان داد [شکل ۱-۲-۱ (ب)]. در سایر موادی که در آنها حد خطی کمتر مشخص است، معمولاً استحکام تسلیم را به صورت تنشی که ۰.۲ درصد (یا مقدار قابل تغییر دیگری) است پلاستیکی ایجاد کند [شکل ۱-۲-۱ (ج)]، تعریف می کنند.

استحکام کششی (S_t) ماده، از تقسیم بیشینه بار به سطح مقطع اولیه آن به دست می آید. واحد این استحکام نیز مانند سایر استحکامها همان واحد تنش است. به ویژه باید توجه کرد که استحکام کششی بر اساس سطح مقطع اولیه محاسبه می شود. این مطلب بسیار مهم است زیرا سطح مقطع ماده انعطاف پذیر تحت بار بیشینه تا اندازه ای کم می شود.

در جدول ۱-۲-۱ استحکام به صورت تنشی که موجب شکست می شود تعریف شده است. ولی می بینید که شکست، خرد باید تعریف شود. فولادی که به شکل آهن نبشی در برج آنتن رادیو به کار می رود اگر در حین کار خم شود می شکنند و ممکن است موجب فرو ریختن برج شود. از آنجا که خمش موجب تغییر شکل پلاستیکی می شود، ساختار قسمتهای مختلف برج طوری طراحی می شود که تنشها را پایینتر از استحکام تسلیم، S_y ، آهن نبشی نگه دارد. ولی در ساخت سیم مهار برای برج آنتن رادیو لازم است که سیم با کشیده شدن از میان یک قالب، تغییر شکل پلاستیکی یابد. این تغییر شکل پلاستیکی حتی اگر تنش از استحکام تسلیم بیشتر باشد، موجب شکست نمی شود. آنچه که وارد محاسبات طراحی می شود بیشینه باری است که سیم می تواند بدون شکست تحمل کند. با تقسیم استحکام کششی S_t ، به بیشینه نیروی پیش بینی شده، می توان ابعاد سطح مقطع لازم برای جلوگیری از شکستن سیم را به دست آورد، این ابعاد باید برابر ابعاد طرح اولیه قبل از هر نوع تغییر شکل پلاستیکی باشند. در صورت لزوم می توان تنش حقیقی، σ ، را که عبارت است از نیرو تقسیم بر سطح واقعی، محاسبه کرد. البته این مقدار در طول نمونه آزمایشی تحت تغییر شکل پلاستیکی تغییر می کند، و در ناحیۀ گلوئی بیشترین مقدار را دارد (شکل ۱-۲-۱). یعنی تنش حقیقی σ_t برای شکست همیشه از استحکام شکست S_t که به سطح اولیه بستگی دارد، بیشتر است. (شکلهای ۱-۲-۱ (ج) و ۱-۲-۱ (د) را ببینید.) تنش حقیقی، تحلیل نیروهای واقعی را در حین تغییر شکل و شکست میسر می سازد؛ ولی تنش اسمی (که بر اساس سطح اولیه



شکل ۳-۲-۱ منحنی استحکام کششی بر حسب عدد سختی برینل (BHN) برای فولاد، برنج، و چدن.

است) برای مهندسان که طبیعتاً باید طرح‌های خود را بر اساس ابعاد اولیه ایجاد کنند اهمیت بیشتری دارد.

بنا به تعریف، سختی مقاومت ماده در مقابل فرورفتگی سطح آن است. چنانکه انتظار می‌رود سختی و استحکام هر ماده مطابق شکل ۳-۲-۱ دقیقاً به هم مربوط اند. عدد سختی برینل (BHN) شاخص سختی است که با اندازه‌گیری سطح فرورفتگی حاصل از سیمه بزرگی محاسبه می‌شود. این فرورفتگی به وسیله گویی از جنس فولاد بسیار سخت یا تنگستن کاریب و تحت بار استاندارد ایجاد می‌شود. یکی دیگر از شاخصهای معمول و مورد استفاده مهندسان برای اندازه‌گیری سختی، سختی راکول (R) است که به سختی برینل ارتباط دارد ولی با اندازه‌گیری عمق فرورفتگی حاصل از یک سیمه کوچک استاندارد به دست می‌آید. با انتخاب شکل‌های متعدد سیمه‌ها و بارهای مختلف، چندین مقیاس برای سختی راکول به دست می‌آید که برای موادی با سختیهای متفاوت به کار می‌روند.

چقرمگی. چقرمگی مقدار انرژی لازم برای شکستن ماده است (شکل ۳-۲-۱). این تعریف با تعریف استحکام که مقدار تنش لازم برای تغییر شکل یا شکستن ماده است تفاوت دارد. انرژی که حاصل ضرب نیرو و در فاصله است بر حسب ژول بیان می‌شود؛ این انرژی کاملاً به سطح زیر منحنی تنش - کرنش وابسته است. ماده انعطاف پذیری که از نظر استحکام شبیه ماده‌ای غیر انعطاف پذیر است، برای شکسته شدن انرژی بیشتری لازم دارد و بنابراین چقرمه‌تر است. آزمایشهای استاندارد شارپی^۱ یا آیزد^۲ دو تسا از روشهای به کار رفته در اندازه‌گیری چقرمگی موادند. این دو نوع آزمایش از نظر شکل نمونه آزمایشی و روش اعمال انرژی با هم اختلاف دارند. چون چقرمگی به هندسه تمرکز تنش نیز بستگی دارد،



شکل ۱-۲-۴ آزمایش چقرمگی. نمونه آزمایش (که باید گان مشخص شده) در اثر ضربه یا ندول متحرك شکسته می شود. مقدار انرژی جذب شده را می توان با به دست آوردن قوسی که پاندول طی کرده محاسبه کرد.

مشخص کردن طریقه انجام آزمایش مورد استفاده از اهمیت خاصی برخوردار است.

مثال ۱-۲-۱ کدامیک از قطعات زیر تنش بیشتری دارد؟ الف) میله ای آلومینیومی با سطح مقطع $24.6 \text{ mm} \times 3.07 \text{ mm}$ تحت بار 7640 kg و در نتیجه نیروی 75000 N ، یا ب) میله ای فولادی با سطح مقطعی به قطر 12.8 mm تحت بار 5000 kg .

حل:

$$\text{واحدها: } \frac{\text{نیوتن}}{(\text{m})(\text{m})} = \text{پاسکال}$$

محاسبات:

$$\frac{(7640)(9.8)}{(0.00246)(0.00307)} = 100 \text{ MPa} \quad (\text{الف})$$

$$\frac{(5000)(9.8)}{(\pi/4)(0.00128)^2} = 380 \text{ MPa} \quad (\text{ب})$$

▲ توضیح. یادآور می‌شود که $ma = (kg)(9.8 \text{ m/s}^2) = \text{نیوتن}$.

مثال ۱-۲-۲ یک سنج طسول ۵۰ میلی‌متری روی یک میله مسی علامتگذاری شده است، میله آنقدر کشیده شده است که علامتهای پیشگفته به فاصله ۵۹ mm از هم قرار گرفته‌اند، کرنش حاصل را محاسبه کنید.

حل:

$$\frac{(\text{mm} - \text{mm})}{\text{mm}} = \frac{\text{mm}}{\text{mm}} = \frac{\text{درصد}}{100} \quad \text{واحدها:}$$

$$\frac{59 - 50}{50} = 0.18 \text{ mm/mm} \quad (یا \ 18\%) \quad \text{محاسبات:}$$

▲ توضیح. اندازه‌گیری بر حسب اینچ نیز همین نتیجه را خواهد داد.

مثال ۱-۲-۳ اگر مدول کشسانی متوسط فولاد برابر 205000 MPa باشد در آن صورت سیمی فولادی به قطر ۲.۵ میلی‌متر و طول ۳ متر تحت بار ۵۰۰ کیلوگرم (4900 N) چقدر کشیده خواهد شد؟

حل: مدول کشسانی E برابر است با $\frac{\text{تنش}}{\text{کرنش}}$ ، یا

$$\text{کرنش} = \frac{s}{E}$$

$$\frac{m}{m} = \frac{N/m^2}{\text{پاسکال}} \quad \text{واحدها:}$$

$$\text{کرنش} = \frac{4900 / (\pi/4)(0.0025)^2}{205000 \times 10^6} = 0.0005 \text{ m/m} \quad \text{محاسبات:}$$

$$\text{کشیدگی} = (0.0005 \text{ m/m})(3 \text{ m}) = 1.5 \text{ mm}$$

▲

□ مثال ۱-۲-۴: سیمی مسی دارای استحکام اسمی شکست 300 MPa و کاهش سطح مقطع ۷۷٪ است. تنش حقیقی شکست σ_f را محاسبه کنید.

حل: براساس سطح مقطع اولیه، A_o ،

$$F = (300 \times 10^6 \text{ N/m}^2) A_o; \frac{F}{A_o} = 300 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = \frac{F}{A_{tr}} = \frac{F}{(1 - 0.77) A_o} = \frac{(300 \times 10^6 \text{ N/m}^2) A_o}{0.23 A_o} = 1300 \text{ MPa}$$

$$\frac{F}{A_{tr}} = \frac{(43000 \text{ psi}) A_o}{0.23 A_o} = 187000 \text{ psi}.$$

توضیح: کرنش حقیقی ϵ را می‌توان از ابعاد سطح مقطع معین کرد. اگر کرنش حقیقی ϵ را به صورت

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

تعریف و فرض کنیم که حجم ثابت است، یعنی $Al = A_o l_o$ ، داریم

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right) \quad \square \quad (1-2-2)$$

این رابطه تعریفی است از کرنش واقعی که برای تمام کرنشها صادق است و به سنجۀ طول بستگی ندارد. ▲

۳-۱ مشخصات گرمایی

ظرفیت گرمایی: ازدید مهندسان و دانش‌ورزان تفاوت بین دما و درون گرمی (آنتالپی) ماده اهمیت زیادی دارد. دما میزان فعالیت گرمایی جسم را نشان می‌دهد، درحالی که درون گرمی، انرژی گرمایی ماده است. این دو از طریق ظرفیت گرمایی به هم مربوط می‌شوند.

در صورتی که حجم تغییر نکند، ظرفیت گرمایی c ، میزان تغییر درون گرمی را در هر درجۀ سانتی گراد نشان می‌دهد. جدولهای فنی گاه گرمای ویژه را به جای ظرفیت گرمایی

* مثالهایی را که با مربع توخالی، □، مشخص شده‌اند به تشخیص مدرس می‌توان حذف کرد (به مقدمه مؤلف مراجعه کنید).

به کار می‌برند. بنا به تعریف، گرمای ویژه هر ماده نسبت ظرفیت گرمایی آن ماده به ظرفیت گرمایی آب است. بنابراین از آنجا که ظرفیت گرمایی آب معادل $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ است محاسبات مربوط به گرما را می‌توان در سیستم دلخواه واحدها انجام داد.

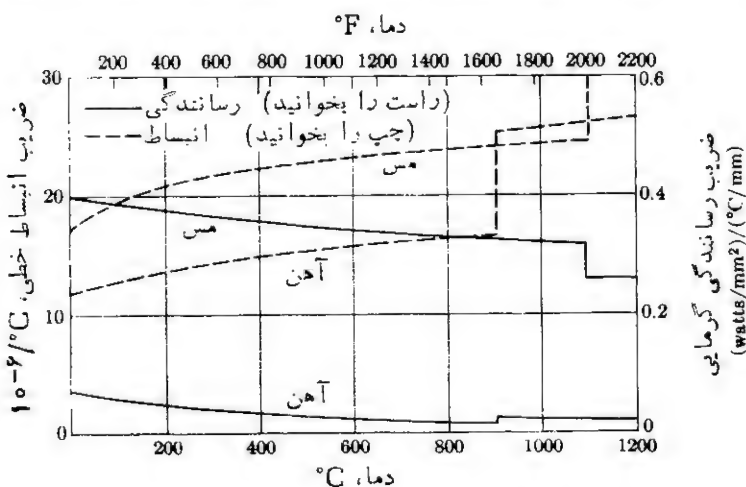
انواع مختلف گرمای تبدیل در مواد اهمیت دارد. مشهورترین آنها گرمای ذوب و گرمای تبخیرند که به ترتیب عبارت‌اند از گرمای لازم برای ذوب و بخارشدن؛ و در واقع هر یک موجب تغییر ماده از یک ساختار اتمی یا مولکولی به ساختار دیگر می‌شوند. بعداً خواهیم آموخت که تغییرات ساختمانی مختلفی ممکن است درون جامدات به وجود آید و این تغییرات نیز مستلزم تغییر گرما یا انرژی گرمایی درونی ماده است.

انبساط گرمایی. انبساطی که معمولاً در خلال گرمایش ماده تولید می‌شود ناشی از ارتعاشات گرمایی شدیدتر اتمهای آن ماده است. بدعنوان اولین تقریب، افزایش طول $\Delta L/L$ ماده با تغییر دمای ΔT ، متناسب است، یعنی

$$\Delta L/L = \alpha_L \Delta T \quad (1-3-1)$$

آزمایشهای دقیقتر نشان می‌دهد که ضریب انبساط طولی، α_L ، معمولاً با ازدیاد دما اندکی افزایش می‌یابد (شکل ۱-۳-۱). داده‌های مربوط به انبساط گرمایی در دمای 20°C (68°F) در پیوست (ج) آمده است.

ضریب انبساط حجمی، α_V رابطه‌ای شبیه معادله (۱-۳-۱) بین تغییر حجم، $\Delta V/V$ و تغییر دما، ΔT برقرار می‌کند. α_V همواره سه برابر مقدار α_L است [مسئله ۱-۳-۳ (ب)]



شکل ۱-۳-۱ تغییرات خواص گرمایی بر حسب دما، ناپیوستگی منحنی مربوط به آهن در 912°C (1673°F) ناشی از ذوب است. آهن به علت نوآرایی اتمها در 912°C (1673°F) یک چنین ناپیوستگی در منحنی نشان می‌دهد (فصل ۳ را ببینید).

را ببینید.*.

ناپوستگیهای موجود در ضرایب انبساط شکل ۱-۳-۱ ناشی از تغییر آرایش اتمی در داخل ماده است. مس دقیقاً در 1084°C (1984°F) ذوب می‌شود. زیر 912°C (1673°F) اتم آهن هشت اتم همسایه دارد، بالای این دما اتمها نوآرایی می‌یابند و به‌صورتی در می‌آیند که در آن هر اتم دوازده اتم همسایه دارد. چون این نوع تغییرات ساختاری بر بسیاری از خواص مهندسی مواد اثر می‌گذارد، در فصلهای بعد آرایشهای اتمی را بررسی خواهیم کرد.

رسانندگی گرمایی. انتقال گرمادر جامدات اغلب از طریق رسانش انجام می‌شود. رسانندگی گرمایی، k ، ضریب تناسب ثابتی است که شادگرهای Q و گرادیان گرمایی $\Delta T/\Delta x$ را به هم مربوط می‌کند

$$Q = k \left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (3-3-1)$$

ضریب رسانندگی گرمایی نسبت به دما نیز حساس است. اما برخلاف ضریب انبساط گرمایی، با رسیدن دما به بالاتر از دمای اتاق، کاهش می‌یابد (دلایل این رفتار بعداً بررسی خواهد شد). تغییرات فشردگی اتمی، که با ذوب و سایر نوآراییهای اتمی ناشی از تغییرات دما همراهاند، در مقادیر رسانندگی گرمایی تغییراتی ایجاد می‌کند. (شکل ۱-۳-۱). رابطه ۳-۳-۱ چنین بیان می‌شود

$$\frac{\text{انرژی}}{\text{مساحت} \times \text{زمان}} = k \left[\frac{\text{تغییر دما}}{\text{ضخامت}} \right]$$

بنابراین، رسانندگی k را اغلب تنها به صورت $(^{\circ}\text{C}/\text{mm})/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ ، یا $(\text{W}/\text{mm}^2)/(^{\circ}\text{C}/\text{mm})$ می‌نویسند.**

* موادی مانند گرافیت و میکا از نوع مواد چند سویند؛ یعنی خواص این مواد در جهت‌های مختلف باوری متفاوت است. بنابراین عبارت کلیش آن به صورت زیر است

$$\alpha_v = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z \quad (\text{الف}, 2-3-1)$$

در اینجا زیر نویسه‌های x ، y ، و z مشخص کننده ضریب انبساط در امتداد سه محور مختصات است. در بسیاری از مواد مهندسی این سه ضریب انبساط با هم برابرند، در این صورت

$$\alpha_v = 3\alpha_L \quad (\text{ب}, 2-3-1)$$

** هنگامی که واحدهای داده‌های مربوط به رسانندگی در جدولها ارائه می‌شوند متأسفانه همیشه سازگاری وجود ندارد. واحدهای ذکر شده در پانوشتهای پیوست (ج) برای تبدیل واحدهای مختلف انگلیسی و متریک با واحدهای فوق سازگارند.

مثال ۱-۳-۱ سیمی آلومینیومی با تنش ۳۴۵ MPa کشیده می‌شود. چه مقدار ازدیاد دما لازم است تا طول به همان اندازه تغییر کند.

حل: داده‌های مربوط به مدولهای کشسانی و انبساط گرمایی را می‌توان از پیوست (ج) پیدا کرد.

$$\begin{aligned}\Delta L/L &= s/E = (345 \times 10^6 \text{ Pa}) / (70000 \times 10^6 \text{ Pa}) \\ &= \alpha \Delta T = (22.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C})(\Delta T) \\ \Delta T &= 22^\circ\text{C} (= 40^\circ\text{F})\end{aligned}$$

توضیح. تفاضل دما، ΔT ، را می‌توان به صورت ۲۲ K نیز ذکر کرد. زیرا هر دو مقیاس، فواصل یکسانی دارند. ▲

مثال ۲-۳-۱ سیمی فولادی به قطر ۲۸ mm و طول ۷۲ m، پس از آنکه با ۳۱ MPa فشرده شود، دما 10°C افزایش می‌یابد. نیرویی که (الف) قبل از افزایش دما و (ب) پس از افزایش دما به سیم وارد می‌شود چقدر است؟ (هیچ تغییری در کل طول مجاز نیست. $-\alpha_{st} = 11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

حل:

$$F_1 = (31 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(\pi/4)(0.0028 \text{ m})^2 = 190 \text{ N} \quad (\text{الف})$$

(ب) معادله مربوط را می‌نویسیم

$$\alpha \Delta T + (e_1 - e_2) = 0 = \alpha \Delta T + \Delta F/AE - (F_2 - F_1) = \alpha \Delta T/AE.$$

داده‌ها را می‌توان از پیوست (ج) پیدا کرد

$$\begin{aligned}F_2 - F_1 &= (11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C})(+10^\circ\text{C})(\pi/4)(0.0028 \text{ m})^2 \\ &\quad \times (205 \times 10^9 \text{ N/m}^2) \\ &= 148 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\text{▲} \quad F_2 = 42 \text{ N}$$

مثال ۳-۳-۱ در یک طرف صفحه‌ای از فولاد زنگ‌نزن به ضخامت ۴ cm جریانی از آب داغ و در طرف دیگر جریان سریعی از هوا برقرار است، آنچنان که دمای دو طرف این صفحه به ترتیب 90°C و 20°C است. چند ژول گرما در دقیقه از میان این صفحه هدایت می‌شود؟

حل: با استفاده از داده‌های پیوست (ج)، داریم:

$$Q = [0.015 \text{ (J/mm}^2 \cdot \text{s)} / (^{\circ}\text{C/mm)}] (70^{\circ}\text{C/mm}) (60 \text{ s/min}) \\ = 15.75 \text{ J/mm}^2 \cdot \text{min}.$$

توضیح. بعداً خواهیم دید که فولاد زنگ‌نزن به علت داشتن مقدار زیاد عناصر آلیاژی، نسبت به سایر فلزات رسانندگی گرمایی (و الکتریکی) کمتری دارد (فصل ۵).

۱-۴ میدان‌های الکتریکی*

رسانندگی (و مقاومت ویژه). اگر فلزات و نیمه‌رساناها در يك میدان الکتریکی قرار گیرند بار الکتریکی هدایت می‌کنند. رسانندگی ماده (σ) به تعداد حامل‌های بار (n)، مقدار باری که هر حامل حمل می‌کند (q) و تحرک هر کدام از حاملها (μ) بستگی دارد. رسانندگی عکس مقاومت ویژه ρ است

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = nq\mu \quad (1-4-1) \text{ الف}$$

واحدهای آن به صورت زیر است

$$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = \left(\frac{\text{تعداد حاملها}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{\text{C}}{\text{تعداد حاملها}} \right) \left(\frac{\text{m/s}}{\text{V/m}} \right) \quad (1-4-1) \text{ ب}$$

در فلزات و نیمه‌رساناهایی که در آنها الکترون‌ها حامل بارند، تعداد بار بر ای هر حامل برابر $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ یا $1.6 \times 10^{-19} \text{ a-s}$ است. تحرک μ را می‌توان به صورت سرعت خالص یا سرعت دانث \bar{v} حاملها در نظر گرفت که از میدان الکتریکی \mathcal{E} ناشی می‌شود و به ترتیب واحدهای m/s یا V/m را دارد

$$\mu = \frac{\bar{v}}{\mathcal{E}} \quad (1-4-2)$$

تحرک معمولاً بر حسب $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ است. روابط (۱-۴-۱) و (۲-۴-۱) مخصوصاً در فصل ۵ که نیمه‌رساناها مطالعه می‌شود به کار خواهند رفت.

ضریب مقاومت ویژه ρ از خواص ماده است، و بنابراین به شکل بستگی ندارد. اگر شکل هندسی یکنواخت باشد آن را می‌توان به مقاومت R تبدیل کرد

* مدرس ممکن است ترجیح دهد که مبحث رسانندگی تا فصل ۵ و مبحث ثابت دی الکتریک تا بخش ۶-۷ یا بخش ۸-۶ بررسی نشود.

$$R = \rho L / A \quad (۳-۴-۱)$$

که در آن L طول و A سطح مقطع است. با معلوم بودن R می توان رابطه اصلی فیزیک برای شدت جریان I بر حسب آمپر و توان P بر حسب وات، یعنی $I = E/R$ و $P = EI = I^2 R = E^2/R = J/s$ را به کار برد.

رفتار دی الکتریکی. البته روشن است که عایقهای الکتریکی بار الکتریکی را منتقل نمی کنند. با این حال این مواد در میدانهای الکتریکی منفعل نمی مانند. ایسن مطلب را می توان با قراردادن دو صفحه الکترود به فاصله d از هم و اعمال ولتاژ E بین دو صفحه نشان داد [شکل ۱-۴-۱ (الف)]. میدان الکتریکی \mathcal{E} گرادیان ولتاژ است

$$\mathcal{E} = \frac{E}{d} \quad (۲-۴-۱)$$

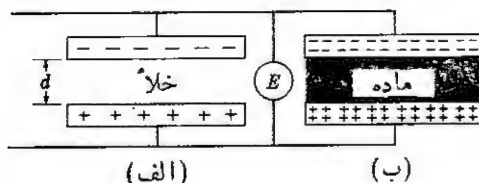
تحت این شرایط وقتی بین دو صفحه هیچ چیزی وجود ندارد، چگالی بار الکتریکی \mathcal{D}_0 روی هر کدام از صفحات با میدان الکتریکی \mathcal{E} متناسب است. به ازای $1V/m$ از میدان الکتریکی، باری معادل 8.85×10^{-12} کولن در هر متر مربع الکترود وجود دارد

$$\mathcal{D}_0 = (8.85 \times 10^{-12} C/V \cdot m) \mathcal{E} \quad (۵-۴-۱)$$

این چگالی بار الکتریکی به ازای $1V/m$ از میدان الکتریکی به $m^2/کولن$ به 55×10^6 احتیاج دارد، زیرا بار الکترود 16×10^{-18} کولن است.

اگر ماده m بین الکترودهای شکل ۱-۴-۱ قرار گیرد در آن صورت چگالی بار الکتریکی می تواند از \mathcal{D}_0 که در بالا بیان شد، تا \mathcal{D}_m افزایش یابد. نسبت $\mathcal{D}_m/\mathcal{D}_0$ ثابت دی الکتریک نسبی κ برای ماده ای است که به عنوان ماده پرکننده فضای بین الکترودها مصرف می شود

$$\kappa = \frac{\mathcal{D}_m}{\mathcal{D}_0} \quad (۶-۴-۱)$$



شکل ۱-۴-۱ چگالی بار الکتریکی \mathcal{D} بر حسب ثابت دی الکتریک نسبی κ . وجود ماده، چگالی بار الکتریکی \mathcal{D}_m را افزایش می دهد، صفحات خازن نیز \mathcal{D}_m را متناسب با ثابت دی الکتریک نسبی κ نگه می دارد $\mathcal{D}_m = \kappa \mathcal{D}_0$.

ثابت دی الکتریک نسبی در فصلهای ۷ و ۸ همراه با مطالعه خواص دی الکتریکی پلاستیکها و سرامیکهای به کار رفته در خازنهای بررسی خواهد شد.* ثابت دی الکتریک نسبی همیشه بزرگتر از ۱ است زیرا هم الکترونها و هم یونهای مثبت و منفی اگر در میدان الکتریکی قرار گیرند، درون ماده جا به جا می شوند.

مثال ۱-۴-۱ قطر یک سیم مسی ۰.۹ mm است. الف) مقاومت هرفوت آن (۰.۳۰۵ m) چقدر است؟ ب) اگر به ۳۰ m از این سیم ولتاژ ۱۵ ولت اعمال شود، چند ولت انرژی مصرف می شود؟

حل: از پیوست (ج)، $\rho = 17 \Omega \cdot \text{nm}$

$$R = (17 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m})(0.305 \text{ m}) / (\pi/4)(9 \times 10^{-4} \text{ m})^2 \quad (\text{الف})$$

$$= 0.008 \Omega$$

$$P = \frac{E^2}{R} \quad (\text{ب})$$

$$= \frac{E^2 A}{\rho L} = \frac{(15 \text{ V})^2 (\pi/4)(9 \times 10^{-4} \text{ m})^2}{(17 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m})(30 \text{ m})} = 2.8 \text{ وات}$$

▲

مثال ۲-۴-۱ سیلیسیم ناخالصی دارای مقاومتی برابر $0.03 \Omega \cdot \text{m}$ و تحرک باری برابر $0.19 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ است. الف) در هر متر مکعب از آن چه تعداد حامل بار وجود دارد؟ ب) اگر به یک تراشه ۰.۴ میلی متری سیلیسیم ولتاژ ۵ mV اعمال شود سرعت رانش حاملهای بار چقدر است؟ اگر ولتاژ صفر باشد چگونه؟

حل: از روابط (۱-۲-۱) و (۲-۴-۱) داریم

$$q = 1 / (0.016 \times 10^{-18} \text{ A} \cdot \text{s})(0.19 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s})(0.03 \Omega \cdot \text{m}) \quad (\text{الف})$$

$$= 1.1 \times 10^{21} / \text{m}^3$$

(ب) وقتی $5 \text{ mV} = \text{ولتاژ}$

* ظرفیت خازن مسطح از رابطه زیر به دست می آید

$$C = \kappa(8.85 \times 10^{-12} \text{ C/V} \cdot \text{m})(A/d) \quad (7-4-1)$$

که در آن A سطح صفحه و d فاصله بین صفحات خازن است.

$$\bar{v} = (0.19 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s})(0.005 \text{ V}/4 \times 10^{-4} \text{ m}) \\ = 2.2 \text{ m/s}$$

وقتی $v = 0$ و ولتاژ، $\bar{v} = 0 \text{ m/s}$.

توضیح. حرکت واقعی الکترون در هر دو حالت اساساً یکسان است. در ولتاژ صفر حرکت تصادفی است و حرکت انتقالی نتیجه‌ای وجود ندارد. با افزایش میدانها سرعت خالص یا سرعت رانش افزایش می‌یابد. ▲

مثال ۱-۴-۳ چراغی ۶ ولتی جریان مستقیمی بتوان ۱۶ وات به مصرف می‌رساند. در هر دقیقه چند الکترون از رشته (فیلامان) آن عبور می‌کند؟

حل: از آنجا که $P = EI$

$$I = P/V = 16 \text{ W}/6 \text{ V} = 2.7 \text{ A};$$

$$(2.7 \text{ A})(60 \text{ s}) = 160 \text{ A}\cdot\text{s}.$$

$$\text{تعداد الکترونها} = 160 \text{ A}\cdot\text{s}/(0.16 \times 10^{-18} \text{ A}\cdot\text{s/el})$$

$$= 10^{21} \text{ الکترون}$$

▲

مثال ۱-۴-۴ دو صفحه خازن (هر کدام به ابعاد $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$) موازی هم و به فاصله 2.2 mm از یکدیگر قرار دارند. بین آنها چیزی وجود ندارد. برای ایجاد بار $10^{-10} \times 2.2 \text{ C}$ کولن در الکترودها، چه ولتاژی لازم است.

حل: با تغییر در روابط (۱-۴-۴) و (۱-۴-۵) و با استفاده از واحدهای متریک

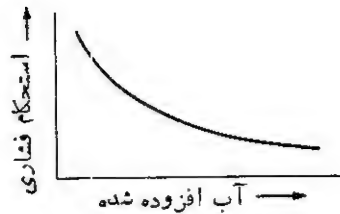
داریم

$$\text{ولت} = \frac{(0.22 \times 10^{-10} \text{ C})/(0.03 \text{ m})(0.02 \text{ m})}{(8.85 \times 10^{-12} \text{ C/V}\cdot\text{m})/(0.0022 \text{ m})} = 10$$

▲

۵-۱ ارائه خواص

اطلاعات کیفی. نمودارهای طرحوار که اثر هر متغیر را بر خاصیت مربوط به آن نشان می‌دهند، برای تبدیل روابط پیچیده تجربی به عبارات کیفی، کمک بسیار ارزنده‌ای می‌کنند. مثلاً شکل ۱-۵-۱ تغییر استحکام بتن را بر حسب مقدار آب اضافه شده نشان می‌دهد. البته اگر مقدار آب به کار رفته کمینه باشد، بتن بیشینه استحکام خود را خواهد داشت، اگر چه

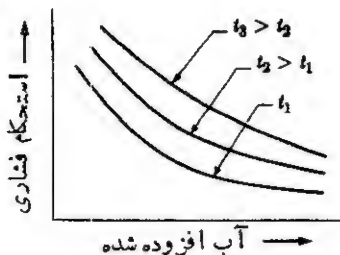


شکل ۱-۵-۱ نمایش طرحوار دومتغیر. استحکام بتن بر حسب مقدار آب اضافه شده. مقدار آب اضافه شده متغیری مستقل محسوب می‌شود.

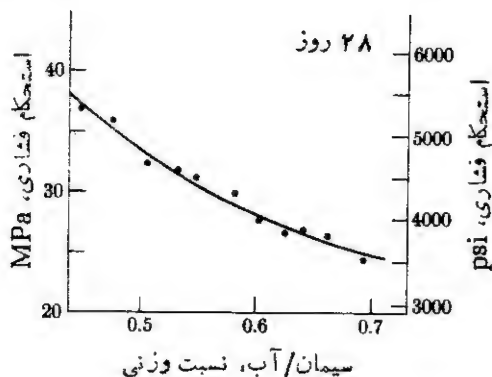
برای تولید بتن قابل مصرف، آب باید به اندازه کافی وجود داشته باشد. به کمک عوامل دیگر، طرحواره سایر متغیرها را نیز می‌توان نشان داد. شکل ۱-۵-۲ عامل زمان، t ، را به رابطه نشان داده شده در شکل ۱-۵-۱ افزوده است. شکل ۱-۵-۲ نشان می‌دهد که (۱) اگر مقدار معینی آب به سیمان بیفزاییم، استحکام آن با گذشت زمان افزایش می‌یابد؛ (۲) در مدت زمان معین در صورت به کار بردن آب اضافی استحکام کمتری به دست می‌آید؛ (۳) اگر مقدار آب مصرفی کمتر شود استحکام معینی را می‌توان در مدت زمان کمتری به دست آورد.

نمودارهای طرحوار در تعیین اینکه چه متغیرهایی را می‌توان برای کسب نتیجه مطلوب کنترل کرد، به مهندسان کمک می‌کنند. به کمک چنین اطلاعاتی آنها می‌توانند اصلاحات لازم را در تولید یا مصرف مواد به وجود آورند.

داده‌های کمی. معمولاً کسب داده‌های کمی در مورد خواص مواد مهم است. مثلاً مهندس طراح به کمک شکل ۱-۵-۳ مشاهده می‌کند که اگر نسبت مقدار آب به سیمان پرتلند ۵/۵ باشد، استحکام فشاری بتن حاصل ۳۳ MPa خواهد بود. در هر حال برای تکمیل اطلاعات، عامل زمان نیز مانند داده‌های دیگر، از جمله اندازه ذرات و دما باید در نظر گرفته شود زیرا هر کدام از این عوامل بر رابطه‌های کمی حاصل اثر می‌گذارد.

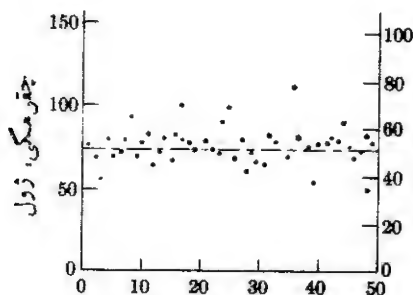


شکل ۱-۵-۲ نمایش طرحوار سه متغیر. رابطه استحکام بتن با زمان t و مقدار آب.



شکل ۳-۵-۱ مقادیر کمی، استحکام بتن بر حسب مقدار آب اضافه شده (از استانداردهای آزمایش ASTM شماره ۳۹ C پیروی شده است).

اختلاف داده‌ها. کلیه داده‌های آزمایشگاهی صنعتی نوعی پراکندگی در مقدار دارند.*
 شکل ۴-۵-۱ پراکندگی نتایج به دست آمده از آزمایش چقرمگی پنجاه نمونه فولادی را در 21°C (70°F) نشان می‌دهد. حتی اگر نمونه‌ها و روشهای آزمایش حتی الامکان یکسان باشند، باز این مسئله وجود دارد. تغییر مقدار چقرمگی می‌تواند از چند منبع سرچشمه بگیرد: (۱) تفاوت‌های غیر قابل رؤیت در داخل نمونه‌های فولادی؛ (۲) تفاوت‌های ظریف در تهیه نمونه‌ها؛ و (۳) تفاوت‌های جزئی در طریقه انجام آزمایش.
 به علت وجود این گستره داده‌ها، معمولاً نتایج آزمایش را به صورت مقدار میانگین (متوسط) یا مقدار میانه (وسط) نشان می‌دهند. در مثال ۱-۵-۱ که در آن ۲۱ مقدار مختلف



شکل ۴-۵-۱ اختلاف داده‌ها. تغییرات حاصل از آزمایش ضربه شاری فولاد SAE ۱۰۴۰ (در 21°C). تمام آزمایشات به طور مشابه انجام شده‌اند.

* یعنی نتایج چندین آزمایش در شرایط مختلف آزمایشگاهی یا صنعتی معین کاملاً یکی نیست. - م.

برای استحکام يك پلاستيك آورده شده است، متناظر میانگین و میانه حاصل به ترتیب برابر 2097 MPa و 2099 MPa است. میانگین، \bar{X} ، و میانه M با آنکه اعدادی نزدیک به هم اند کاملاً یکسان نیستند. این اختلاف ناشی از این است که در استحکامهای پایین نتایج پراکنده ترند.

دانستن یکی از مقادیر میانگین یا میانه مهندس طراح یا دانشورز کاربردی را کاملاً راضی نمی کند. زیرا بدین وسیله گستره استحکامها برایش مشخص نمی شود. از این رو او در پی دانستن انحراف استاندارد (S.D) است. انحراف استاندارد مقیاس آماری پراکندگی است و از رابطه زیر محاسبه می شود

$$SD = \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)} \quad \square (1-5-1)$$

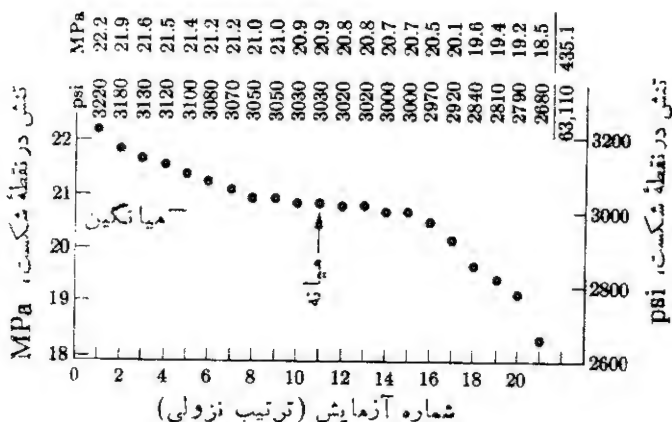
که در آن \bar{X} میانگین و X_i هر کدام از n مقدار مجزا است. در عمل انحراف استاندارد از این نظر اهمیت دارد که چنانچه داده ها برای پیروی از قوانین توزیع کافی باشند، تقریباً دو سوم نتایج بین $\pm 1 SD$ ، و ۵٪ داده های آماری در خارج از $\pm 2 SD$ قرار می گیرند.

تألیف محاسبات معمولاً سعی می شود که خواص ماده تا حدی که داده های موجود اجازه می دهند، دقیق محاسبه شوند. در این کتاب، داده های موجود دو یا سه و به ندرت چهار رقم پانچنی دارند. این داده ها از نوعی اند که اغلب برای مواد تجارتي داده می شود. جوابهای حاصل از ماشین حساب معمولاً شامل ارقام بی معنی است. لذا از به حساب آوردن ارقام بی معنی باید خودداری کرد. توصیه می شود جواب نهایی (نه جوابهای ضمن کار) را به تعداد یکی* بیشتر از ارقام با معنی موجود در داده صحیحی که کمترین دقت را دارد، گرد کنید.

مثال ۱-۵-۹ داده های آزمایش برای تعیین تنشهای شکست ۲۱ نمونه پلاستیکی به ترتیب نزولی در شکل ۱-۵-۵ منظم شده است.

الف) دو مقدار میانه (M) و میانگین \bar{X} را تعیین کنید.
 ب) پراکندگی یا مقدار انحراف استاندارد، SD، را محاسبه کنید.

* رقم افزوده شده گاه باعث می شود تقریب بهتری از عدد (قبل از گرد شدن) به دست آید. استثنای کردن اعداد صحیح با این مثال واضح می شود، برای تعیین میانگین وزن خانواده ای همه نفری با ترازیوی به دقت يك صدم، انتظار نداریم که چون سه عدد صحیح است برای وزن متوسط فقط يك رقم اعشار در نظر گرفته شود.



شکل ۵-۵-۱ داریانس در داده‌های آزمایش (مثال ۱-۵-۱ را ببینید). میانگین عبارت است از مقدار متوسط کلیه مقادیر داده شده. مقدار میانه عبارت است از عدد وسط این اعداد.

حل:

(الف) یازدهمین مقدار (میانه) برابر ۲۰۹ MPa است. مقدار میانگین برابر است با

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} = \frac{43501 \text{ MPa}}{21} = 2072 \text{ MPa}$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}} = \sqrt{\frac{16979}{20}} = 29 \text{ MPa} \quad \square (ب)$$

توضیح: داده‌های شکل ۵-۵-۱ نوعی تغییر آماری دارند، زیرا از ۲۱ مقدار داده شده ۱۴ مقدار در فاصله ۲۰۹ + ۲۰۷ قرار دارد. میانه بیشتر از میانگین است زیرا پراکندگی در میان داده‌های کمتر از مقدار میانه بیشتر است.

مروز و بررسی مطالب

خلاصه

اگر قرار باشد که صنعت و تکنولوژی احتیاجات جامعه را برآورده کند در آن صورت باید کاربرد درست و به جای مواد ممکن باشد. این امر مستلزم انتخاب مواد با مشخصات بهینه از نظر قیمت و در دسترس بودن و شرکت دادن آنها در طرحی است که بی‌خطر و اطمینان‌پذیر و با رفاه افراد سازگار باشد. برای دسترسی به چنین صنعتی باید موادی را که خصوصیات ویژه‌ای مثل استحکام، رسانندگی گرمایی و الکتریکی و شکل‌پذیری

دارند انتخاب کرد؛ بنا بر این خواص مختلفی که مبنای طرحها و تولیدات اند مورد توجه ما هستند.

خواص و رفتار مواد ناشی از ساختار داخلی آنهاست. اگر مجموعه خواص ویژه ای مورد نظر باشد، مواد باید به گونه ای انتخاب شوند که ساختارهای اتمی، بلوری و سایر آرایشهای داخلی مناسب را داشته باشند. اگر ساختار داخلی مواد در خلال تولید یا مصرف تغییر کند، تغییرات متناظری نیز در خواص حاصل می شود.

در این فصل تعدادی از (و البته نه کلیه) خواصی که باید مورد توجه قرار گیرند ذکر شده است. با وجود این به کمک خواصی که در اینجا ذکر شده اند، در فصلهای بعد می توان صور ساختارهای داخلی مواد را شرح داد، که این ساختارها الف) در مقابل تغییرات حاصل از تنشهای مکانیکی اعمال شده مقاومت می کنند؛ ب) مشخصات معمولی مواد را وقتی که در دماهای بالا تحت ارتعاشات گرمایی قرار می گیرند توجیه می کنند؛ و ج) به چگونگی رفتار و پاسخ مواد در میدان الکتریکی مربوط می شوند. این صور مهم اند زیرا آگاهی از آنها به طراح در تعیین، و به صنعتگر در تولید موادی با ساختار داخلی و مشخصات بهینه برای محصولات حال و آینده کمک می کند.

در مواد جامد کرنش کشسان به وجود می آید که با تنش، به هم میزانی که اعمال شود متناسب است. پس از حذف تنش اعمال شده این کرنش از بین می رود. اگر تنش اعمال شده به ماده انعطاف پذیر به حد کافی بالا باشد، کرنش پلاستیکی دائمی در آن به وجود می آید. مواد پراستحکامی که کرنش پلاستیکی زیادی در آنها به وجود می آید چقرمه اند، یعنی قبل از شکستن به انرژی قابل ملاحظه ای نیاز دارند.

انرژی گرمایی که برای افزایش دما به جسم داده شده، ارتعاش گرمایی در ماده را بالا می برد. این انرژی اضافی، ساختار را منبسط می کند. انرژی گرمایی از طریق ارتعاشات اتمی و (درفلزات) از طریق رسانش الکتریکی به مناطق سردتر ماده منتقل می شود. رسانندگی الکتریکی اغلب مواد رسانا به علت نفوذ الکترونها انجام می شود. در جسم عایق تحت میدانهای الکتریکی، بارهای الکتریکی حرکت نمی کنند، اما جا به جا می شوند، در نتیجه دی الکتریکها گرچه «عایق» محسوب می شوند خواص الکتریکی مفیدی دارند.

در انتهای فصل به اهمیت و دقت داده های مربوط به خواص توجه شده است. خواننده باید با اندازه گیریهای اصلی (میانگین و میان) و مقیاس پراکندگی (انحراف استاندارد) نیز آشنا شود. علاوه بر این به خواننده توصیه شده است که در ارائه جوابهای به دست آمده آزمایشین حساب، از به کار بردن ارقام بی معنی خودداری کند.

سوالات تشریحی

۱. سه نوع فولاد را نام ببرید و مشخصات هر کدام را ذکر کنید.

۲. سیر ماشین را می‌توان از ورق زره ساخت به‌طوری‌که در هنگام تصادف مجاله نشود. با بیان حداقل سه دلیل شرح دهید که چرا از این ماده استفاده نمی‌شود.
۳. با بررسی يك قطعه چوب بعضی از مشخصات ساختاری آن را شرح دهید و بگویید که آنها چگونه خواص چوب را تحت تأثیر قرار می‌دهند.
۴. قبل از جنگ جهانی دوم، شرکتی بدنه يك اتومبیل را از فولاد زنگ‌نزن ساخت. تا به حال اثر زنگ‌زدگی قابل اغماضی در آن دیده شده است. اگر این طرح برای تمام خودروها به کار می‌رفت چه اشکالاتی ممکن بود به وجود آید.
۵. سه خاصیت لازم و مهم مواد را که در رشته مهندسی خود (یعنی مهندسی مکانیک، عمران، برق و...) با آن برخورد می‌کنید، ذکر کنید.
۶. استحکام، انعطاف‌پذیری و چقرمگی را باهم مقایسه کنید.
۷. چرا تنش حقیقی همیشه بیشتر از تنش اسمی است؟ چرا مهندس هنگام طراحی پل از تنش اسمی استفاده می‌کند؟
۸. در شکل ۱-۲-۱ (ج) چرا معمولاً استحکام تسلیم بر اساس ۰.۲٪ کرنش دائمی تعریف می‌شود.
۹. وقتی به نقطه بالایی منحنی شکل ۱-۲-۱ (ب) برسیم، بسار برداشته می‌شود. منحنی باربرداری عمودی خواهد بود یا شیب‌دار؟ چرا؟
۱۰. در سؤال ۹، پس از بساربرداری، علائم سنجی روی قطعه مسدود آزمایش گذاشته می‌شود. دوباره به آن بار اعمال می‌شود تا بشکند. ازدیاد طول محاسبه شده به چه طریق تحت تأثیر قرار می‌گیرد؟
۱۱. درصد کاهش سطح مقطع را نمی‌توان از درصد ازدیاد طول محاسبه کرد (یا برعکس). با وجود آنکه هر دو مقیاس انعطاف‌پذیری‌اند، چرا چنین است؟
۱۲. استحکام اسمی شکست (مبتنی بر سطح اولیه) معمولاً کمتر از استحکام کششی است، ولی تنش واقعی شکست بیشتر از استحکام کششی است. دلیل آن را شرح دهید.
۱۳. چقرمگی را می‌توان به صورت سطح زیر منحنی تنش-کرنش تعریف کرد. آیا این امر با این مفهوم که چقرمگی انرژی لازم برای شکستن است سازگار است؟
۱۴. واژه‌های حد کشمان و استحکام تسلیم گاهی به صورت مترادف به کار می‌روند. چرا این امر همیشه صحت ندارد؟
۱۵. «استحکام کششی، تنشی است که در آن، کرنش از حالت کشسان به پلاستیکی تبدیل می‌شود.» در باره اعتبار این عبارت نظر دهید.
۱۶. وضعیتی را بیان کنید که در آن کیلوگرم در عددی غیر از ۹.۸ ضرب شود و نیوتن به دست آید.
۱۷. در کتابهای اروپایی که درماتیک انگلیسی زبان نیز کاربرد بسیار دارند، مقدار سختی بر حسب kg/mm^2 (یعنی kg بر سطح فرورفتگی) مشخص می‌شود. این امر در محاسبات مهندسی چه مشکلاتی می‌تواند ایجاد کند؟

۱۸. تیزی لبه يك اړه برقی را آزمایش کنید. چرا ویژگیهای مثل (الف) استحکام تسلیم، (ب) مدول کشسانی، (ج) مقاومت و یسزه و (د) مقاومت در برابر خوردگی در آن اهمیت دارند؟

۱۹. ضریبهای انبساط گرمایی و رسانندگی گرمایی در صورت استفاده از $^{\circ}\text{C}$ یا $^{\circ}\text{F}$ مطلق K یکسان خواهند بود. در فصلهای بعد در جاهایی که انتخاب $^{\circ}\text{C}$ یا K تفاوت دارد دچار اشکال خواهیم شد. چرا در اینجا اهمیتی ندارد؟

۲۰. داده‌های مربوط به آهن و مس موجود در پیوست (ج) را در نظر بگیرید. اگر قرار باشد از آنها در محاسبات مهندسی استفاده شود تحت چه شرایط کاری باید اصلاح شوند؟

۲۱. رابطه ۱-۳-۲ (ب) را ثابت کنید.

۲۲. ضریب رسانندگی گرمایی آهن، اندکی بالاتر از $^{\circ}\text{C } 900$ ، دارای ناپیوستگی است (شکل ۱-۳-۱). در این دما حجم نیز تغییر می‌کند. این تغییر حجم، انبساط است یا انقباض؟ چرا؟

۲۳. انواع حاملهایی را که می‌توانند بارهای الکتریکی را در مایع انتقال دهند، ذکر کنید.

۲۴. ثابت دی‌الکتریک نسبی ممکن است کمتر از يك باشد. چرا؟

۲۵. چرا بهتر است اقسام اضافی (بی‌معنی) را به‌جای مراحل میانی در جواب نهایی حذف کرد؟

۲۶. با مراجعه به فلزات پیوست (ج)، دو مجموعه از داده‌ها را مشخص کنید که به هم مربوط باشند. منحنی طرح‌وار ارتباط آنها را رسم کنید، و اصول ارتباط آنها را شرح دهید.

مسائل*

۱-۱-۱ سیم يك وسیله خانگی مانند نان برشته‌کن یا قهوه‌جوش برقی را در نظر بگیرید. مواد مصرفی و دلیل احتمالی انتخاب آنها را ذکر کنید.

۲-۱-۱ لامپ چراغ برق را به‌دقت نگاه کنید. چند نوع ماده مختلف در آن می‌بینید؟ مشخصات گرمایی و الکتریکی هر يك از این مواد کدام‌اند؟ هر کدام از این مواد چه نوع

* مسائلی که شبیه مثالهای متن‌اند یا ارتباط نزدیک با عناوین ذکر شده دارند توسط اعداد این‌انیک مشخص شده‌اند؛ و از آنها می‌توان برای شروع استفاده کرد. بقیه مسائل، مانند مسائلی که در عمل با آنها مواجه می‌شویم، تنها شکل تغییر یافته مسائل قبلی نیستند بلکه باید روابط لازم به‌دست آیند. این مسائل با حروف سیاه مشخص شده‌اند. دانشجو باید بتواند تعداد زیادی از این نوع مسائل را که مبتنی بر درك مفهوم‌اند حل کند.

مسائل مربوط به بحثهایی که در اختیار مدرساند با مربع توخالی مشخص شده‌اند.

مشخصات گرمایی و الکتریکی باید داشته باشند؟

۱-۲-۱ به سیم مسی نباید بیشتر از 70 MPa تنش کششی اعمال کرد. اگر لازم باشد که بار 2000 kg را تحمل کند چه قطری باید داشته باشد؟

جواب: 19 mm

۱-۲-۲ کرنش کشسان در سیم مسی تحت تنش 70 MPa چقدر است؟ (مدول کشسانی و سایر خواص فلزات مهم در پیوست (ج) داده شده است.)

۱-۲-۳ الف) میله‌ای فولادی به قطر 12.7 mm تحت باری برابر 7000 kg (و بنابراین نیرویی معادل 68600 N) قرار دارد. چه تنشی بر این میله اعمال می‌شود؟ ب) اگر مدول کشسانی این میله 205000 MPa باشد، این بار چه کرنشی در آن ایجاد می‌کند؟

جواب: الف) 540 MPa (ب) 0.00026

۱-۲-۴ در مسئله ۱-۲-۳ میله پیشینه‌ی بار 11800 kg را بدون تغییر شکل پلاستیکی تحمل می‌کند. استحکام آن چقدر است؟

۱-۲-۵ در مسئله ۱-۲-۳، میله تحت بار 11400 kg (و بنابراین نیرویی معادل 111000 N) می‌شکند. قطر نهایی آن 7.87 mm است. الف) استحکام حقیقی شکست آن چقدر است؟ ب) استحکام اسمی شکست آن (بر اساس سطح اولیه) چقدر است؟

جواب: الف) 2280 MPa (ب) 875 MPa

۱-۲-۶ □ مفرغ دارای مدول کشسانی 110000 MPa ، استحکام تسلیم 158 MPa ، استحکام اسمی شکست 238 MPa ، و کاهش سطح مقطع 34% است. الف) کرنش حقیقی درست قبل از آنکه تسلیم آغاز شود چقدر است؟ ب) تنش حقیقی در نقطه شکست چقدر است؟ (به مثال ۱-۲-۴ رجوع کنید.)

۱-۲-۷ آلیاژ مسی دارای مدول کشسانی 110000 MPa ، استحکام تسلیم 230 MPa و استحکام کششی 350 MPa است. الف) برای اینکه میله‌ای به طول 3 m از این آلیاژ، به مقدار 15 mm کشیده شود تنش لازم چقدر است؟ ب) قطر میله چقدر باشد تا بتواند بدون تغییر شکل دائمی نیرویی معادل 22000 N را تحمل کند؟

جواب: الف) 55 MPa (ب) 9.2 mm

۱-۲-۸ قطر سیمی از آلیاژ منیزیم 1.05 mm است. طبق پیوست (ج)، مدول کشسانی آن 45000 MPa است. تغییر شکل پلاستیکی در بار 105 kg (که -- نیوتن است) آغاز می‌شود. کل کرنش پس از اعمال بار 1.21 kg ، 0.00081 است. کرنش دائمی

به وجود آمده در بار 121 kg چقدر است؟

۹-۲-۱ آلومینیم (آلیاژ ۶۱۵۱) دارای مدول کشسانی 70000 MPa و استحکام تسلیم 275 MPa است. الف) سیمی به قطر 2.75 mm از این آلیاژ چقدر بار را بدون رسیدن به نقطه تسلیم می تواند تحمل کند؟ ب) اگر باری معادل 44 kg به 30.5 m از این سیم اعمال شود کل ازدیاد طول چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) 1630 N یا 167 kg ب) 32 mm

۱۰-۲-۱ فلز مونل ($70 \text{ Ni} - 30 \text{ Cu}$) دارای مدول کشسانی 180000 MPa و استحکام تسلیم 450 MPa است. الف) میله ای به قطر 18 میلی متر از این فلز چه مقدار بار را بدون رسیدن به نقطه تسلیم می تواند تحمل کند؟ ب) اگر بیشینه ازدیاد طول مجاز برای میله ای به طول 2.1 متر برابر 2.5 میلی متر باشد چه مقدار بار می تواند به این میله اعمال شود؟

□ ۱۱-۲-۱ با مراجعه به مثال ۴-۲-۱ و توضیح آن، کرنش حقیقی در نقطه شکست چقدر است؟

جواب: 1.47% (یا 147%)

۱۲-۲-۱ میله ای از فولاد 1020 به قطر 64 mm و طول 1.83 m تحت باری معادل 4450 N قرار دارد. اگر این بار به میله ای از فلز مونل $30-70$ وارد شود (مسئله ۱۰-۲-۱) را ببینید) تفاوت طول در دو حالت چقدر است؟

۱۳-۲-۱ بنابر يك اصل تجربی قدیمی استحکام کششی فولاد در واحد انگلیسی معادل تقریباً 500 برابر عدد سختی برینل آن است؛ یعنی $(BHN) \approx 500 (S_t)_{\text{psi}}$. الف) این موضوع را در مورد شکل ۳-۲-۱ (ب) بررسی کنید. ب) رابطه ثابت مشابهی نیز بین $(S_t)_{\text{MPa}}$ و BHN پیدا کنید.

جواب: $(S_t)_{\text{MPa}} \approx 3.55 (BHN)$

□ ۱۴-۲-۱ با مراجعه به مسئله ۶-۲-۱، کرنش حقیقی را در نقطه شکست به دست آورید.

۱۵-۲-۱ سیمی از فولاد 1040 ، 89 mm قطر دارد. استحکام تسلیم آن 980 MPa و استحکام کششی آن 1130 MPa است. همچنین آلیاژ آلومینیومی موجود است که استحکام تسلیم آن 255 MPa ، و استحکام کششی آن 400 MPa است. الف) سیم فولادی چقدر (چند درصد) از سیم آلومینیومی سنگینتر یا سبکتر باشد تا بار 40 kg را تحمل کند و همان تغییر شکل کشسان سیم آلومینیومی در آن ایجاد شود. ب) سیم فولادی چقدر (چند درصد) از سیم آلومینیومی سبکتر یا سنگینتر باشد تا بتواند همان بار بیشینه را بدون تغییر شکل تحمل کند؟ ج) این تفاوت چقدر باید باشد تا سیم بتواند بار بیشینه را

بدون شکست تحمل کند. (دانه‌مایی: نسبت جرم‌ها را بدون محاسبه سطح مقطع‌های واقعی معین کنید.)

جواب: الف) $۷۰\% +$ ب) $۳۲\% +$ ج) $۳\% -$

۱-۳-۱ دمای میله‌ای برنجی به طول ۲ متر، ۸۰°C (۱۴۴°F) افزایش می‌یابد. براساس داده‌های پیوست (ج)، چه تنش لازم است تا طول به همین مقدار تغییر کند؟
جواب: ۱۷۶ MPa

۱-۳-۲ سیمی آهنی بین دو ساختمان بسته شده و تحت تنش ۲۰ MPa قرار گرفته است. دمای هوا ناگهان از ۲۵°C به ۱۹°C کاهش می‌یابد. تنش جدید چقدر است؟

۱-۳-۳ ضریب انبساط خطی گرمایی متوسط میله‌ای از فولاد مخصوصی $۱۲ \times ۱۰^{-۶} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-۱}$ است. الف) برای ایجاد تغییر طول برابر تغییر طول حاصل از تنش ۶۲۰ MPa دما چه مقدار باید تغییر کند؟ ب) تغییر حجم حاصل از این دما چقدر است؟

جواب: الف) (۴۵۰°F) $\Delta T = ۲۵۰^{\circ}\text{C}$ ب) ۰.۰۹%

۱-۳-۴ ریل فولادی جوش داده شده‌ای که در محلی با دمای ۳۵°C (۹۵°F) قرار گرفته طوری خم شده است که نمی‌تواند منقبض شود. اگر دما به ۰°C برسد چه مقدار تنش در آن ایجاد می‌شود؟

۱-۳-۵ الف) اگر به جای صفحه فولادی زنگ‌نزن در مثال ۱-۳-۳ صفحه‌ای مسی قرار دهیم چقدر گرما منتقل می‌شود. ب) مقدار آن را بر حسب وات بر سانتی‌متر مربع محاسبه کنید (ثانیه \times آمپر \times ولت = ژول یا ثانیه \times وات = ژول).

جواب: الف) $۴۲۰\text{ J/mm}^2 \cdot \text{min}$ ب) ۷ W/mm^2

۱-۳-۶ مایع گرمی از طریق يك لوله مسی به قطر ۵۰ mm با دیواره‌ای به ضخامت ۱۰ mm پمپ می‌شود. دمای فلز در داخل ۱۴۰°C و در خارج ۲۵°C است. گرمایی را که در هر ساعت در هر متر لوله منتقل می‌شود، تخمین بزنید.

۱-۳-۷ مسئله ۱-۳-۶ را برای آهنی که دمای داخل و خارج آن به ترتیب ۸۴۰°C و ۲۲۵°C است تکرار کنید. (داده‌های پیوست (ج) ممکن است مناسب نباشند.)

جواب: ۱۵۰۰ MJ/hr

۱-۳-۸ الف) به کمک داده‌های پیوست (ج) نسبت رسانندگی گرمایی به رسانندگی الکتریکی، k/σ ، برای هرفاز چقدر است؟ ب) براساس محاسبات خود در مورد ارتباط بین رسانندگی‌های گرمایی و الکتریکی نتیجه‌ای کلی بگیرید.

۱-۴-۱ در هر متر مکعب از يك نیمرسانا $۱۰^{۲۰}$ الکترون وجود دارد و تحرك الکترونها

برابر $V \cdot s / 19m^2$ (الف) مقاومت ویژه این نیمرسانا چقدر است؟ (ب) رسانندگی آن چقدر است؟

جواب: (الف) $33\Omega \cdot m$ (ب) $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$

۱-۴-۲ یک نیمرسانا در هر متر مکعب 10^{21} الکترون دارد که به عنوان حاملهای بار عمل می کنند. مقاومت ویژه آن $1\Omega \cdot m$ (الف) تحرک الکترونها (μ) چقدر است؟ (ب) اگر گرایسان ولتاژ V/mm ۱۶۰۰۰ باشد، سرعت رانش v چقدر است؟

۱-۴-۳ (الف) اگر سیمی از مس خالص (با مقاومت ویژه $17\Omega \cdot nm$) به قطر $1mm$ در یک مدار الکتریکی که جریان 10 آمپر از آن می گذرد، به کار رود، در $305m$ (یک فوت) چند وات گرما به هدر می رود؟ (ب) اگر به جای سیم مسی از سیمی برنجی با همان اندازه استفاده شود گرمای هدر رفته چند وات بیشتر است؟ (مقاومت ویژه برنج $= 0.32\Omega \cdot nm$)

جواب: (الف) $66W$ (ب) $6W$ Δ

۱-۴-۴ در مسئله ۱-۲-۸، طول سیم قبل از بار گذاری $307m$ است. (الف) مقاومت آن برابر ——— است. (ب) اگر از این سیم 15 ولت برق عبور کند، ——— الکترون در هر میلی ثانیه وارد سیم می شود.

۱-۴-۵ اندازه گیری نشان می دهد که اگر به دوسر $57mm$ از نیمرسانایی ولتاژ 30 میلی ولت اعمال شده باشد سرعت رانش الکترونها در این نیمرسانا که در هر متر مکعب 10^{20} حامل بار دارد، $200mm/s$ است. مقاومت ویژه نیمرسانا چقدر است؟
جواب: $0.164\Omega \cdot m$

۱-۴-۶ چگالی الکترون در الکترودهای مثال ۱-۴-۴ چقدر است؟

۱-۴-۷ فضای بین صفحات مثال ۱-۴-۴ با وزقی از پلی استیرن به ضخامت $22mm$ پر شده است، و با اعمال ولتاژ 10 ولت، بار از $10^{-10}C \times 240$ به $10^{-10}C \times 60$ افزایش می یابد. ثابت دی الکتریک نسبی پلی استیرن چقدر است؟

جواب: 2.5

۱-۴-۸ ثابت دی الکتریک نوار شیشه ای برابر 6 است. آیا خازنی که در آن از این نوع ماده با ضخامت $25mm$ به عنوان عایق استفاده شود ظرفیت بیشتری دارد یا خازن دیگری با همان سطح که در آن از عایق پلاستیکی به ضخامت $100\mu m$ و با ضریب دی الکتریکی برابر 21 استفاده شده است؟

۱-۴-۹ اگر بدون تغییر ولتاژ اعمال شده فضای بین الکترودهای خازن از $10mm$ به

به 6 mm کاهش یابد، ثابت دی الکتریک نسبی جدید خازن چقدر باید باشد تا چگالی بار یکسان باقی بماند؟ ثابت دی الکتریک نسبی عایق موجود 3.3 است.

جواب: 2.0

۱-۴-۱۰ به جای سیم فولادی مسئله ۱-۲-۱۵ سیمی مسی به همان ابعاد قرار داده می شود. مقاومت سیم مسی چند درصد بیشتر ($+$)، یا کمتر ($-$) خواهد بود؟

۱-۴-۱۱ سیمی مسی (به قطر 1.1 mm) برای ساخت مقاومت خاصی در نظر گرفته شده است. اگر سیمی از آلومینیم خالص مقاومت یکسانی داشته باشد چقدر سنگینتر ($+$) یا سبکتر ($-$) است؟ (دانه‌مایی: بدون محاسبه سطوح واقعی، نسبتی از جرمها به دست آورید.)

جواب: 48% -

۱-۵-۱ در نیرسانایی $10^{21} \times 1.6$ حامل در هر متر مکعب وجود دارد. تحرك آنها $0.5\text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ است. ماشین حساب مقاومت ویژه را $0.00487900781\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ نشان می دهد. این جواب را با ارقام با معنی مناسب بیان کنید.

جواب: 0.00488 (یا 0.00488)

۱-۵-۲ «چهار سوارکار» 15 ، 197 ، 211 و 181 پوند وزن دارند. میانگین وزن آنها را با تعداد مناسب ارقام با معنی ذکر کنید.

۱-۵-۳ نمرات ۱۵ دانشجو در امتحان مواد (از ۱۲۵ نمره) 89 ، 137 ، 95 ، 98 ، 57 ، 77 ، 121 ، 69 ، 101 ، 108 ، 51 ، 88 ، 117 ، 80 ، 109 بوده است. الف) میانۀ نمرات چقدر است؟ ب) میانگین نمرات چقدر است؟ ج) نمراتی که در یک چهارم قرار می گیرند کدام اند؟

جواب: الف) 95 ب) 93.1 ج) 109 ، 77

۱-۵-۴ نتایج مسابقات بسکتبال سال گذشته را به دست آورید. مقدار میانگین-میانۀ و انحراف استاندارد تعداد گلها را الف) در زمین خود و ب) در زمین حریف حساب کنید.

۱-۵-۵ مقدار الف) میانگین و ب) میانۀ چگالی نوع بخصوصی ابرلاستیکی را براساس داده های تجربی زیر حساب کنید: 0.26 ، 0.30 ، 0.23 ، 0.24 ، 0.21 ، 0.26 ، 0.27 ، 0.29 ، 0.28 گرم بر سانتی متر مکعب (یا Mg/m^3). □ ج) انحراف استاندارد داده ها چقدر است؟

جواب: الف) 0.256 Mg/m^3 ب) 0.26 Mg/m^3

ج) 0.030 Mg/m^3 ($= 0.030\text{ g/cm}^3$)

آشنایی با مواد: مروری بر پیوندهای شیمیایی

چشم‌انداز فصل

در تمام جامدات، اتمها را پیوندها به یکدیگر متصل می‌کنند. پیوندها در جامدات تأمین‌کننده استحکام و خواص الکتریکی و گرمایی مربوط به آنان‌اند. مثلاً پیوندهای قوی سبب ایجاد نقطه ذوب بالا، مدول کشسانی بالا، فاصله بین اتمی کوتاه‌تر، و ضریب انبساط گرمایی کمتر می‌شوند.

در این فصل به مفاهیمی که در شیمی عمومی با آنها سروکار داریم می‌پردازیم. نخست لازم است نقش الکترونهاى ظرفیتی را در پیوندهای اصلی - یونی، کووالانسی، و فلزی - با جزئیات کافی بررسی کنیم تا بتوانیم آثار آنها را بر فاصله بین اتمی و کوئوردیناسیون اتمی پیش‌بینی کنیم. همچنین این پیوندها مبنای دسته‌بندی کردن مواد به فلزات، پلی‌مرها (پلاستیکها) و سرامیکها‌یند.

هدف از مطالعه

۱. مرور آن قسمت از شیمی عمومی که به پیوندهای بین اتمها مربوط است.
۲. درک اصطلاحات و مفاهیم کلیدی، به طوری که بتوان مباحث بعدی را آسانتر دنبال کرد.
۳. دانستن ویژگیهای سه نوع پیوند اولیه اصلی (البته می دانیم که پیوندهای واقعی معمولاً ترکیب بیش از یک نوع از این پیوندها دارند).
۴. ایجاد تصویری کیفی از چگونگی تغییر نیروها و انرژیها با فواصل اتمی (مطابق شکل ۲-۵-۲) تا در فصلهای بعد پایه‌ای باشد برای درک فاصله بین اتمی، مدول کشسانی، انبساط گرمایی، و غیره.
۵. درک عوامل مختلفی که بر اندازه اتم اثر می گذارند. باید بتوان اختلافهای ابعاد اتم را در جدول ۲-۵-۱ تفسیر کرد.
۶. دانستن ویژگیهای سه نوع اصلی ماده (البته می دانیم که بسیاری از مواد ویژگیهای بینابین دارند).
۷. بسط بعضی از کلیات مربوط به خواص که با نوع پیوند ارتباط دارند.

۱-۲ اتمها و یونهای تنها

اتم واحد اصلی ساختار داخلی مواد است. مفاهیم اولیه مربوط به اتمهای تنها برای بسیاری از خوانندگان آشناست. این مفاهیم شامل عدد اتمی، جرم اتمی و ارتباطهای جدول تناوبی اند. ترازهای انرژی حاصل از الکترونهاى اتمها نیز مورد توجه قرار خواهند گرفت.

واحد جرم اتمی. از آنجا که اتمها، در مقایسه با آنچه به طور روزمره سروکار داریم دارای جرم فوق العاده کوچکی اند، بهتر است از واحد جرم اتمی به عنوان پایه‌ای برای بسیاری از محاسبات استفاده شود. بنا به تعریف، یک دوازدهم جرم اتمی کربن ۱۲، معمولیترین ایزوتوپ کربن، واحد جرم اتمی است. در هر گرم $10^{23} \times 12$ عدد ۰۲۲۵۶۰۰ واحد جرم اتمی وجود دارد. از این ضریب تبدیل (به نام عدد آوگادرو، N) به روشهای مختلفی استفاده می شود. از آنجا که کربن طبیعی تقریباً یک درصد C^{13} و ۹۸٫۹ درصد C^{12} دارد، میانگین جرم اتمی کربن ۱۲٫۰۱۱۰۰۰ واحد جرم اتمی است، که همان مقداری است که در جدول تناوبی (شکل ۲-۱-۱) و در جدولهای عناصر برگزیده (پیوست (ب)) ذکر شده است. جرم اتمی عناصری که خواننده معمولاً با آنها سروکار دارد عبارتند از:

H ۱۰۰۰۷۹ واحد جرم اتمی (یا ۱۰۰۰۷۹ گرم بر $10^{24} \times 6.02$ عدد اتم)

D ۱۲۰۱۱

O ۱۵۹۹۹۴

Cl ۳۵۲۵۳

Fe ۵۵۸۴۷

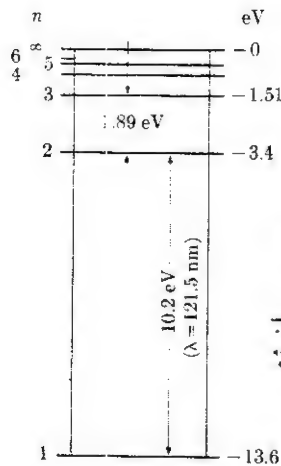
در تمام محاسبات بجز محاسبات بسیار دقیق، این مقادیر را می توان به صورت ۱۶، ۱۲، ۱، ۳۵، ۵ و ۵۵۸۴۷ واحد جرم اتمی (amu) گرد کرد.

عدداً اتمی نشان دهنده تعداد الکترونهاى يك اتم خنثى (و تعداد پروتونهاى هسته) است. هر عنصر عدد اتمى واحدی دارد. فهرست عناصر بر گزیده، از هیدروژن با عدد اتمى يك تا اورانیم (با عدد اتمى ۹۲) در پیوست (ب) آمده است. الکترون، به ویژه الکترونهاى مدار آخر بر بیشتر خواص مورد توجه مهندسان اثر مى گذارد. مثلاً ۱) خواص شیمیایی را تعیین مى کند؛ ۲) پیوندهای بین اتمی و در نتیجه ویژگیهای مکانیکی و استحکام را سبب مى شود؛ ۳) اندازه اتم را تعیین مى کند و بر رسانندگی الکتریکی مواد اثر مى گذارد؛ ۴) بر ویژگیهای نوری اثر مى گذارد. در نتیجه به توزیع ترازهای انرژی الکترونها در اطراف هسته اتم توجه خاصی مبذول خواهیم کرد.

جدول تناوبی. تناوب عناصر را در درس شیمی دیده ایم، لذا ویژگیهای آن را در اینجا تکرار نخواهیم کرد و فقط به این نکته توجه مى کنیم که اتمها در جدول تناوبی (شکل ۱-۱-۲) بر حسب زیاد شدن عدد اتمی مرتب شده اند، به نحوی که ستونهای عمودی که گروه نامیده می شوند به اتمهایی با مشخصات شیمیایی و الکترونی مشابه تعلق دارند. به طور خلاصه عناصری که در منتهی الیه سمت چپ جدول تناوبی قرار دارند به آسانی به صورت یون در مى آیند و یون مثبت یا کاتیون تشکیل مى دهند و آنهایی که در قسمت بالا و سمت راست واقع اند به راحتی الکترون مى پذیرند یا به اشتراك مى گذارند، یعنی الکترونگاتیونند.

الکترون. از آنجا که الکترون جزئی از تمام اتمهاست، بار الکتریکی منفی آن معمولاً به عنوان یکا به کار مى رود. دریکاهای فیزیکی، این بار برابر 1.6×10^{-19} A.S برای هر الکترون (یا 1.6×10^{18} باره کولن بر الکترون) است.

حرکت الکترونها در فاصله بین هسته های مجاور به صورت امواج ساکن است؛ به همین دلیل الکترونهاى همراه اتم باید از قوانین خاصی پیروی کنند. بار دیگر توجه خواننده را به مباحث شیمی مقدماتی جلب مى کنیم، ولی در اینجا فقط چند نکته را به اختصار بیان مى کنیم. در هر اتم، الکترونها حالت های انرژی خاصی دارند که ادینتال نامیده مى شود. مطابق شکل ۱-۲-۲ انرژی الکترون در اطراف اتم هیدروژن را به روشنی مى توان تعیین



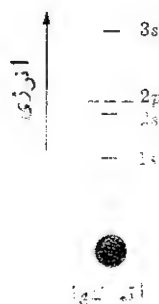
شکل ۲-۱-۲ ترازهای انرژی الکترونها (در هیدروژن). الکترون هیدروژن معمولاً در پایینترین تراز انرژی قرار می‌گیرد. (در این تراز، انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از هسته 13.6 eV یا $1.8 \times 10^{-18} \text{ J}$ (۲۲ ژول است) الکترونها فقط در ترازهای ویژه‌ای می‌توانند انرژی بیشتری دریافت کنند. بین این ترازها شکافهایی وجود دارد، که انرژیهای ممنوع‌اند.

کرد.* نکته مهم آن است که گستره‌های وسیعی از انرژیهای واسطه در دسترس الکترونها قرار ندادند. اینها انرژیهای ممنوع‌اند زیرا بسامدهای مربوط به آنها امواج ساکن به وجود نمی‌آورند. اگر الکترون اتم هیدروژن بسامدهای خارج از محدوده تحریر نشده باشد پایینترین ارییتال شکل ۲-۱-۲ را اشغال خواهد کرد.

شکل ۳-۱-۲ طرحواره انرژی پایینترین ارییتالهای سدیم را نشان می‌دهد. هر ارییتال بیش از دو الکترون نمی‌تواند داشته باشد. این دو باید چرخش مخالف داشته باشند. در این حالت نیز بین ارییتالها شکافهای انرژی ممنوع وجود دارد که الکترونها قادر به اشغال آنها نیستند.

از نظر ما بالاترین ارییتال اشغال شده چون الکترونها ظرفیتی را دربر دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این الکترونها را می‌توان با میدان الکتریکی نسبتاً ضعیفی از مدار خارج کرد و کاتیونهای مثبت پیشگفته را به دست آورد. انرژی لازم برای این عمل انرژی یونش نام دارد. در بخش بعد خواهیم دید که الکترونها مدار آخر یعنی الکترونها ظرفیتی در جامدات فلزی ازجا کنده می‌شوند و به جای آنها تنها باید اتم پیوند برقرار کنند آزادند تا در تمام حجم فلز حرکت کنند. این امر اساس رسانندگی الکتریکی و گرمایی را تشکیل می‌دهد.

* این کار با آزمایشهای طیف‌نگاری انجام می‌شود.



شکل ۳-۱-۲ ترازهای انرژی الکترونها (سدیم). چون اتم سدیم یازده الکترون دارد و هر تراز (اربیتالی) تنها می‌تواند دو الکترون داشته باشد، چندین اتم سدیم با هم تعامل می‌کنند، پس این اربیتالها شگاف وجود دارد. برای خارج کردن الکترون (فلزیسی) سدیم، انرژی اتم سدیم ۵۱۰ الکترون ولت (1.6×10^{-19} ژول) لازم است.

وقتی که اربیتالهای ظرفیتی پر نشده‌اند، اتم می‌تواند تعداد محدودی الکترون اضافه را در این حالت‌های انرژی پر نشده بپذیرد و به صورت یون منفی یا کاتیون درآید. این الکترون‌های اضافه با اربیتالهای ظرفیتی پر نشده نیز می‌توانند الکترون‌ها را به اشتراک بگذارند. این امر که در پیوندهای کووالانسی اهمیت پیدا می‌کند در پیوندهای فلزی نیز اهمیت دارد.

مثال ۱-۱-۲ نقره استرلینگ، تقریباً از $75\% \text{ w/o}$ مس و $25\% \text{ a/o}$ نقره تشکیل شده است. a/o مس و نقره چقدر است؟

حل:

$$\text{آلیاژ ۱۰۰ گرمی} = 75\% \text{ amu Ag} + 25\% \text{ amu Cu}$$

$$\text{Ag: } 75\% \text{ amu Ag} / (107.87 \text{ amu Ag} / \text{اتم}) = 85.75 \text{ اتم} = 88 \text{ a/o}$$

$$\text{Cu: } 25\% \text{ amu Cu} / (63.55 \text{ amu Cu} / \text{اتم}) = 12.85 \text{ اتم} = 12 \text{ a/o}$$

مثال ۲-۱-۲ جرم الماس کوچکی 3.1 mg است. الف) اگر کربن حاوی 1 a/o ایزوتوپ ^{13}C باشد، چه تعداد اتم ^{13}C در آن موجود است. ب) درصد وزنی آن ایزوتوپ چقدر است؟

* درصد وزنی یا w/o : درصد اتمی یا a/o : درصد خطی یا t/o : درصد حجمی یا v/o و درصد مولی یا m/o نشان داده می‌شود. در فازهای متراکم (مایعات و جامدات) درصد وزنی، و در گازها معمولاً درصد حجمی و مولی به کار می‌رود. مگر آنکه صریحاً واحد دیگری منظور شود.

حل:

$$\text{الف)} \quad \frac{0.00031 \text{ g}}{(12011 \text{ g}/0.06022 \times 10^{24} \text{ اتم})} = 1.55 \times 10^{20} \text{ اتم C}$$

$$\text{اتم } ^{13}\text{C} = 1.7 \times 10^{18} = (0.011)(1.55 \times 10^{20})$$

ب) مبنا: ۳۱ mg

$$\frac{\text{جرم کربن } ^{13}}{\text{جرم کل کربن}} = \frac{(1.7 \times 10^{18})(13 \text{ amu})}{(1.55 \times 10^{20})(12011 \text{ amu})} = 1.2 \text{ w/o}$$

توضیح. از آنجاکه جرم ^{13}C بیشتر از میانگین جرم اتمهاست، درصد وزنی آن از درصد اتمی بیشتر است.

مثال ۳-۱-۲ با استفاده از پیوست (ب) ترتیب اربیتال‌های اتم آهن، Fe^{2+} و Fe^{3+} را نشان دهید.

حل: چون ترتیب اربیتال‌های آرگون $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ است بنابراین

$$\text{Fe: } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2 \quad (1-1-2)$$

هنگام یونش ابتدا الکترونهای $4s$ خارج می‌شوند، بنابراین

$$\text{Fe}^{2+}: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 \quad (2-1-2)$$

$$\text{Fe}^{3+}: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 \quad (3-1-2)$$

مثال ۴-۱-۲ ده گرم نیکل رami خواهیم برای آبرکاری سطح فولادی به مساحت 0.08953 m^2 به کار بریم. الکترولیت حساوی یون Ni^{2+} است. الف) ضخامت لایه نیکل چقدر خواهد بود؟ ب) اگر بخوایم این کار را در مدت ۵۰ دقیقه انجام دهیم چه جریانی لازم است؟

حل:

الف)

$$10 \text{ g} / (89 \times 10^6 \text{ g}/\text{m}^3)(0.08953 \text{ m}^2) = 1.25 \times 10^{-6} \text{ m (یا } 1.25 \mu\text{m)}$$

$$\left[\frac{10 \text{ g Ni}}{58.71 \text{ g Ni}/0.06 \times 10^{24} \text{ اتم}} \right] \times$$

$$\left[\frac{\text{الکترون}/\text{اتم} (2)(0.016 \times 10^{-18} \text{ A.s})}{(3000 \text{ s})} \right] = 1.09 \text{ آمپر} \quad \text{ب)}$$

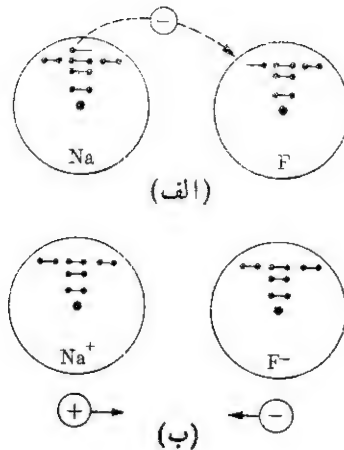
توضیح. دانشجویان باید تاکنون با داده‌های موجود در پیوستها آشنا شده باشند. ه

۲-۲ نیروهای پیوندی قوی (پیوندهای اصلی)

از آنجا که در طرحهای مهندسی بیشتر فرآورده‌ها از مواد جامد به دست می‌آیند، مطالعهٔ جاذبه‌ای که اتمها را در کنار هم نگه می‌دارد لازم است. برای درک اهمیت مطلب، قطعه‌ای سیم مسی را در نظر بگیرید. هر گرم از این سیم شامل $63.54 / 10^{24} \times 0.02 \times 0.02$ اتم است. با توجه به چگالی مس هر سانتی‌متر مکعب آن ۸۹ برابر این عدد یعنی $10^{24} \times 8.9$ اتم $(10^{24} / m^3 \times 8.9)$ را در بر می‌گیرد، در این شرایط نیروی جاذبه‌ای که اتمها را به یکدیگر پیوند می‌دهد قوی است. اگر این طور نبود اتمها به آسانی از هم جدا می‌شدند؛ فلز تحت بارهای کوچک تغییر شکل می‌داد؛ و انرژی گرمایی ناشی از ارتعاشهای اتمی موجب گازی شدن اتمها در دمای پایین می‌شد. بدین ترتیب، خواص مهندسی هر ماده به نیروهای بین‌اتمی موجود در آن بستگی دارد.

وجود جاذبه‌های بین اتمی به دلیل ساختار الکترونی اتمهاست. گازهای نجیب (بی‌اثر با انظر شیمیایی غیرفعال) مانند هلیوم، نئون، و آرگون نسبت به دیگر اتمها جاذبهٔ محدودی دارند زیرا در اربیتال الکترونی خارجی آنها یعنی مدار ظرفیتی، آرایش پایداری از هشت الکترون (برای هلیوم ۲ الکترون) وجود دارد. از طرفی آنها فاقد بارخالص ناشی از عدم توازن تعداد پروتونها و الکترونها هستند. برخلاف گازهای نجیب، باید به یکی از روشهای زیر آرایش پایداری هشت الکترونی را در اربیتالهای خسارجی خود به وجود آورند: (۱) گرفتن الکترون اضافی؛ (۲) از دست دادن الکترون؛ یا (۳) به اشتراك گذاشتن الکترون. در دروش نخست، یونهایی با بارخالص مثبت یا منفی به وجود می‌آیند و در نتیجه هر یون نسبت به یونهایی که بار مخالف دارند جاذبهٔ کولنی خواهد داشت، در روش سوم برای اینکه به اشتراك گذاشتن الکترونها عملی شود اتحاد کاملی بین اتمها لازم است. هر جا که ممکن باشد، این سه روش پیوندهای قوی یا اصلی به وجود می‌آورند. برای شکستن این پیوندها گاهی ۵۰۰ کیلوژول برمول (یعنی ۵۰۰۰۰۰ ژول برای $10^{24} \times 0.02 \times 0.02$ اتم پیوند) انرژی لازم است. پیوندهای ضعیفتر یا فرعی دیگری (کمتر از ۴۰ کیلوژول برمول) نیز همواره وجود دارند لکن هنگامی به شمار می‌آیند که تنها نیروهای موجود باشند (بخش ۲-۴).

پیوند یونی. ساده‌ترین نوع پیوندهای اتمی پیوند یونی است که در نتیجهٔ جاذبهٔ بین بارهای مثبت و منفی به وجود می‌آید. اتمهای عناصری مثل سدیم و کلسیم، که به ترتیب يك و دو الکترون در اربیتال ظرفیتی خود دارند، این الکترونها را به آسانی رها می‌کنند و به صورت یون مثبت درمی‌آیند. به همین ترتیب اتمهای کلر و اکسیژن به راحتی به الکترونهای اربیتالهای ظرفیتی خود می‌افزایند و با پذیرفتن يك یا دو الکترون، مدار خارجی را هشت الکترونی می‌کنند و به صورت یون منفی درمی‌آیند. از آنجا که بین بارهای مثبت و منفی



شکل ۲-۲-۱ یونش. (الف) انتقال الکترون از اربیتال خارجی سدیم به فلوئور؛ (ب) یونهای مثبت و منفی حاصل با نیروی کولنی یکدیگر را جذب می‌کنند و پیوند یونی تشکیل می‌دهند.

همواره جاذبه کولنی وجود دارد، همان‌طور که در شکل ۲-۲-۱ طرحواره آن دیده می‌شود بین یونهای مجاور و ناهمنام نوعی پیوند برقرار خواهد شد.

هر بار منفی نسبت به تمام ذراتی که بار مثبت دارند و هر بار مثبت نسبت به تمام ذراتی که بار منفی دارند دارای جاذبه است. در نتیجه یونهای سدیم تا آنجا که ممکن است بیشترین تعداد یون منفی کلر و یونهای کلر نیز بیشترین تعداد یونهای مثبت سدیم را به دور خود جمع می‌کنند، به‌طوری که جاذبه در تمام جهات یکسان است (شکل ۲-۲-۲). شرط اصلی برای ایجاد ماده‌ای با پیوند یونی آن است که تعداد بارهای مثبت با تعداد بارهای



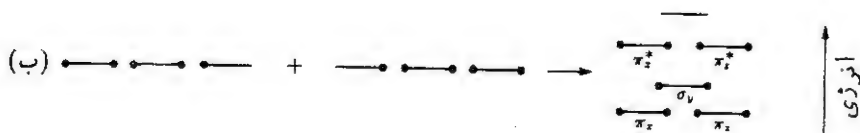
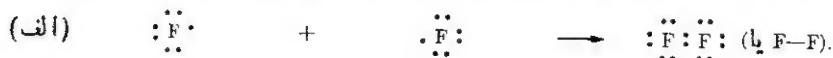
شکل ۲-۲-۲ ساختار سه‌بعدی سدیم کلرید. یون مثبت سدیم با هر شش یون منفی کلر که در مجاورت آن قرار دارند کوئوردیناسیون شده و نسبت به آنها جاذبه یکسان دارد. (ب) شکل ۲-۲-۱ مقایسه کنید که در آن، ساختار نشان می‌دهد که یونهای Na^+ نیز یونهای Cl^- را احاطه می‌کنند).

منفی مساوی باشد. بنابراین سدیم کلرید ترکیب NaCl و منیزیم کلرید ترکیب MgCl_2 را دارد، زیرا هراتم منیزیم می‌تواند دو الکترون از پوسته ظرفیتی خود خارج کند درحالی که هراتم کلر تنها یک الکترون می‌پذیرد.

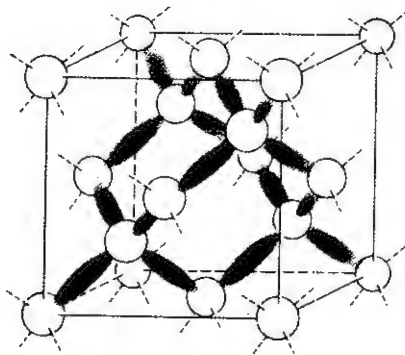
از آنجا که این جاذبه‌های کولنی بر تمام اتمهای همسایه اثر می‌گذارد موادی که پیوند یونی دارند بسیار پایدارند، به‌ویژه اگر شامل یونهای چندظرفیتی باشند. مثلاً هنگامی که منیزیم و اکسیژن ترکیب می‌شوند و MgO تشکیل می‌دهند، به‌ازای هر $10^{24} \times 6$ یون Mg^{2+} و $10^{24} \times 6$ یون O^{2-} موجود در محصول، 570 کیلوژول برمول یعنی 570000 ژول (یا 1360000 کالری) آزاد می‌شود. بنابراین برای آنکه MgO برای انرژی غلبه کند و ذوب شود باید دمای آن را تقریباً تا 2800°C (5000°F) بالا برد.

پیوند کووالانسی. نوع دیگری از نیروهای اصلی با جاذبه قوی، پیوند کووالانسی است که در آن الکترونها به اشتراک گذاشته می‌شوند. شکل ۲-۲-۳ این اشتراک را برای دو اتم فلوئور در F_2 به دو طریق نشان می‌دهد. در بسیاری از موارد تصویر اول (نقاطی که الکترون را نشان می‌دهند یا «خط پیوند») برای منظور ما کافی است. مثلاً شکل ۲-۲-۴ (الف) در مورد کربن. با این حال باید توجه داشت که محل الکترونها دقیق نیست و با عدم قطعیت همراه است. بنا بر این، این تصویر همیشه رضایت بخش نیست، شق دیگر، شکل طرح‌سوار ۲-۲-۴ (ب) است که برای نشان دادن مکانی که احتمال وجود جفت الکترونهای به اشتراک گذاشته شده در آن بیشتر است از ناحیه سایه زده استفاده شده است.

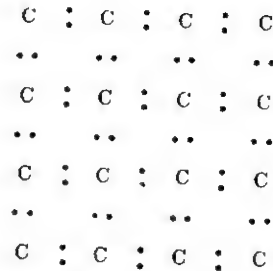
شکل ۲-۲-۳ (ب) به انرژی الکترونهای ظرفیتی (اریتال $2p$) فلوئور که با هم ترکیب شده و اریتال مولکولی تشکیل می‌دهند اختصاص دارد. یادآوری می‌شود که وقتی از دو اتم مجزا مولکولی تشکیل می‌شود، انرژی متوسط الکترونهای مدار آخر یا ظرفیتی افت می‌کند. بنابراین پیوند کووالانسی را می‌توان بر حسب انرژی در نظر گرفت، زیرا برای انجام عکس واکنشی که شکل ۲-۲-۳ (ب) نشان می‌دهد، انرژی لازم است.



شکل ۲-۲-۴ پیوند کووالانسی (فلوئور). (الف) معمولاً برای ساده تر شدن مطلب از نقطاتی که الکترون را نشان می‌دهند یا از خط پیوند استفاده می‌شود؛ (ب) ترازهای انرژی اریتالی (طرح‌واره). برای شکستن یک مول ($10^{24} \times 6$ عدد) از این پیوندها 160000 ژول (380000 کالری) انرژی لازم است. [قسمت (ب) تنها الکترونهای $2p$ را نشان می‌دهد.]



(ب)



(الف)

شکل ۲-۲-۴ ساختار الماس. استحکام پیوندهای کووالانسی سختی زیاد الماس را توجیه می‌کند. (الف) نمایش دوبعدی؛ (ب) نمایش سه‌بعدی، پیوند به‌شکل ناحیه‌ای نشان داده شده است که احتمال وجود الکترون در آن زیاد است (سایه زده‌شده).

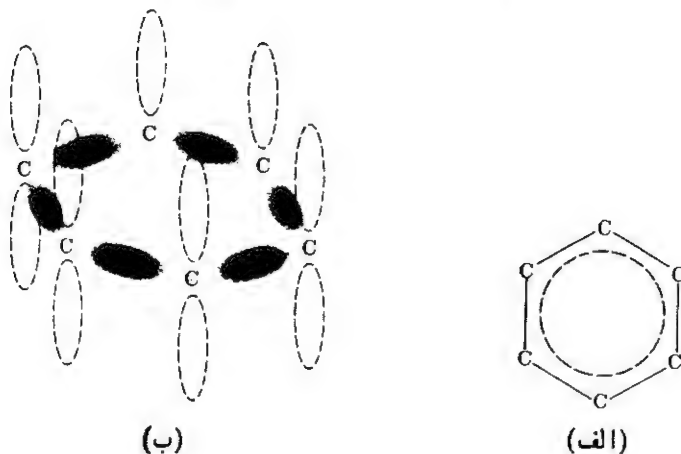
این امر که پیوندهای کووالانسی نیروی جاذبه‌ای قوی بین اتمها ایجاد می‌کنند در مورد الماس کاملاً مشهود است. الماس سخت‌ترین ماده‌ای است که در طبیعت یافت می‌شود و تماماً کربن است. هر کربن چهار الکترون ظرفیتی دارد که با اتمهای همسایه به‌اشتراک گذاشته می‌شوند تا شبکه‌ای سه‌بعدی که به‌طور کامل با جفت‌های کووالانسی پیوند یافته است، تشکیل شود (شکل ۲-۲-۴). تنها سختی الماس نیست که استحکام پیوند کووالانسی را نشان می‌دهد؛ بلکه الماس را باید تا دمای فوق‌العاده بالایی (بیش از 3000°C) گرم کنیم تا انرژی گرمایی، ساختار آن را از هم پاشد (یعنی ذوب شود).*

برخلاف جاذبه‌های کولنی که تاجایی که فضای اطراف اجازه می‌دهد یونهای ناهمنام را به همسایگی خود می‌آورند، پیوندهای کووالانسی بین اتمهای خاصی تشکیل می‌شوند. در شبکه الماس [شکل ۲-۲-۴ (ب)] تعداد پیوندهاست که تعداد اتمهای همسایه را محدود می‌کند نه فضای موجود. در شکل ۲-۲-۳ دو اتم فلوئور با پیوند کووالانسی ۱۶۵ کیلو ژول بر $10^{24} \times$ ۶ره پیوند، به یکدیگر متصل شده‌اند؛ با این حال هیچ‌یک از این دو اتم نسبت به سایر اتمهای فلوئور (یا مولکولهای دیگر فلوئور) آنچنان جاذبه‌ای ندارند که موجب بهم نزدیک شدن آنها بشود. به همین دلیل F_2 در 85 K (یعنی 188°C - یا 360°F -) تنها با گرفتن $[3\text{ k}]$ بر مول تبخیر و به گاز تبدیل می‌شود. اگر پیوند تنها به یک جفت اتم معین مربوط شود، واژه فضاویژه به کار می‌رود و بنابراین جهتدار است.

* برای شکستن تمام پیوندهای یک مول اتم کربن ($10^{24} \times 0.6$) حدود 570 کیلوژول، یا 180 کیلوکالری، انرژی لازم است.

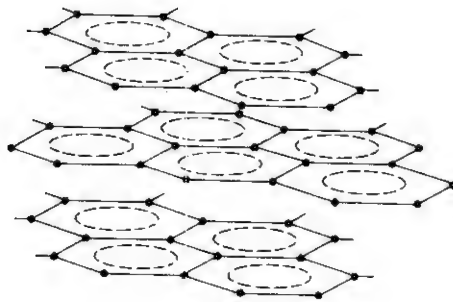
استثنایی که در مورد فضاویژگی پیشگفته، در پیوندهای کووالانسی دیده می‌شود ترکیباتی‌اند که يك حلقهٔ بنزن دارند و در بارهٔ آنها در کتابهای شیمی بحث شده است. (شکل ۲-۲-۵). از هر اتم کربن يك الکترون (در مجموع شش الکترون) اجزا کننده می‌شود، احتمال وجود این شش الکترون در اطراف حلقه در هر نقطه‌ای یکسان است.* این الکترونها بر اثر میدانهای الکتریکی متناوب از يك طرف مولکول به طرف دیگر حرکت می‌کنند ولی (بجز در شرایط غیر عادی فاجعه آمیز) نمی‌توانند مولکول را ترك کنند. برای هر يك از این الکترونهاى ازجا كنده شده، به تعداد اتمهای موجود در حلقه، الگوی موجی وجود دارد.

پیوند فلزی. علاوه بر پیوند یونی و کووالانسی، نوع سوم مکانیسم جذب بین اتمی اصلی، پیوند فلزی است. ساختن الگوی پیوند فلزی به سادگی دو پیوند دیگر نیست. اما برای این منظور می‌توان از مفهوم الکترونهاى آزاد که در پاراگراف قبل شرح دادیم، استفاده کرد. نخست گرافیت را در نظر بگیرید (شکل ۲-۲-۶)؛ که در آن (علاوه بر جفت‌های الکترونی که بین اتمهای معینی وجود دارند) لایه‌های اتمهای کربن نیز حاوی الکترون آزادند. الکترونهاى ازجا كنده شده می‌توانند به میدانهای الکتریکی پاسخ دهند و به صورت موجی



شکل ۲-۲-۵ الکترونهاى ازجا كنده شده، (الف) حلقهٔ بنزن؛ (ب) اربیتال بین اتمهای کربن فضاویژه است. الکترونهاى سایر اربیتالها در مواجهه با میدان الکتریکی داخلی یا خارجی می‌توانند درون مولکول حرکت کنند و آزادند. (برای سادگی، اتمهای هیدروژنی که در صفحهٔ اتمهای کربن وجود دارند رسم نشده است.)

* این الکترونها در پیوندهای π ، که عمود بر صفحهٔ مولکول‌اند، شرکت می‌کنند.

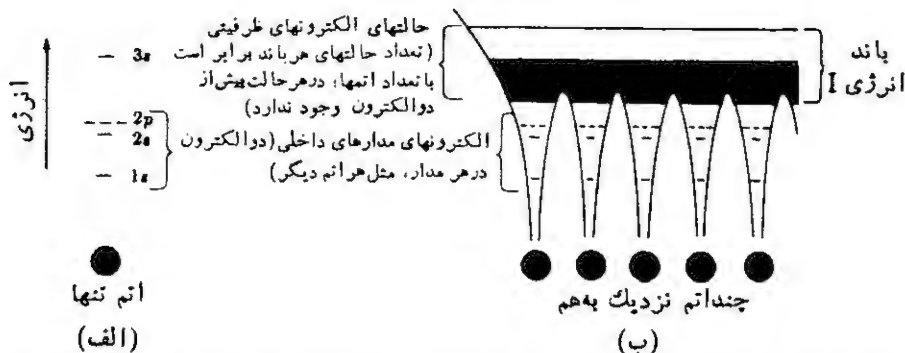


شکل ۶-۲-۲ الکترونهای آزاد در صفحات گرافیت [هر لایه چندین حلقه بنزن دارد] (شکل ۵-۲-۲). رسانندگی در جهت افقی بیش از ۱۰۰ برابر جهت عمودی است.

در داخل صفحات گرافیت حرکت کنند.* در واقع رسانندگی هنگامی میسر خواهد بود که الکترونی مثبت برای خارج کردن الکترونها از يك سر لایه، وجود داشته باشد و الکترونی منفی در دسترس باشد تا الکترونهایی را که به سردیگر می رود، تأمین کند.

فلزات الکترونهای آزادی دارند که در سه جهت می توانند حرکت کنند. بنا بر این معمولاً از واژه «ابر الکترونی» یا «گاز الکترونی» صحبت می شود، زیرا الکترونهای مدار خارجی که پیوند آنها استحکام کمتری دارد می توانند آزادانه در ساختار فلز حرکت کنند. طرحواره اربیتالهای فلزات در شکل ۷-۲-۲ برای سدیم رسم شده است. همچنان که اربیتالهای مولکولی F_2 در طرف راست شکل ۳-۲-۲ (ب) را توسط اربیتالهای اتمی شرح دادیم، ترازهای انرژی سدیم چند اتمی با انرژی اربیتالهای يك اتم مجزا، که در شکل ۳-۱-۲ شرح دادیم، متفاوت است. اختلاف عمده شکل ۷-۲-۲ (الف) با ۷-۲-۲ (ب) آن است که در آن، اربیتال ظرفیتی خارجی به ترازهایی، مساوی با تعداد اتمهای موجود در سیستم، تقسیم شده است لازم به تذکر است که میانگین انرژی الکترونهای آخرین مدار یا ظرفیتی شکل ۷-۲-۲ (ب) کمتر از انرژی اربیتال ۳s برای اتمهای تکی است و این امر، پیوند را در فلزات توجیه می کند. به طور خلاصه برای غلبه بر پیوند فلزی و جدا کردن اتمها از یکدیگر و تولید مجدد اربیتالهای اتمی مجزا، انرژی لازم است. برای مثال از نظر کیفی می توان پیوند قوی اتمهای تنگستن را نام برد. نقطه ذوب و نقطه جوش آن بسیار بالاست. (به ترتیب 3400°C و 5900°C است.) همچنین مدول کشسانی فوق العاده زیادی دارد (345000 MPa ، برای مقایسه پیوست (ج) را ببینید). در مقابل،

* همچنان که در مورد حلقه بنزن گفته شد، تعداد الکوههای موجی مساوی تعداد اتمهای کربن در لایه افقی است. توجه داشته باشید که چون الکترونهای آزاد تنها در صفحات افقی حرکت می کنند، برای حرکت آنها از يك لایه به لایه های اتمی دیگر، مکانیسم حرکتی وجود ندارد. (سؤال ۲۶ را در آخر فصل ببینید.)



شکل ۲-۲-۷ الکترونیهای ظرفیتی در فلز (سدیم). الکترونیهای ظرفیتی که آزاد و متحرک اند در یک باند انرژی قرار می گیرند، این الکترونها قادرند در تمام نقاط فلز حرکت کنند الکترونیهای ظرفیتی تنها نیمه پایینی باند را پر می کنند. انرژی میانگین انرژی الکترونیهای ۳ در یک اتم تنها کمتر است، پیوند فلزی ناشی از همین اختلاف انرژی است.

از نقطه ذوب پایین سدیم (97.8°C) و نرم بودن آن معلوم می شود که پیوندهای ضعیفی دارد. هر دو فلز الکترونیهای آزاد دارند که سبب رسانش الکتریکی و گرمایی می شود. قبل از آنکه در این بخش پیرامون پیوندهای اصلی، یا نیروهای جاذب قوی نتیجه گیری کنیم، باید بگوییم، در حالتی که نوعی پیوند در سراسر ماده وجود دارد انواع دیگر پیوند نیز می تواند موجود باشد بنا بر این انواع پیوندهای مخلوط متداول اند.

مثال ۲-۲-۱ پیوند کووالانسی بین دو اتم کربن $\text{C}-\text{C}$ ، برابر 370 کیلو ژول بر مول (88 کیلو کالری بر $10^4 \times 6$ پیوند) است. انرژی نور از رابطه زیر به دست می آید

$$E = h\nu \quad (2-2-1)$$

که در آن h ثابت پلانک (6.6×10^{-34} ژول-ثانیه) و ν بسامد نور است. برای شکستن یک پیوند $\text{C}-\text{C}$ چه طول موجی لازم است؟

حل:

$$\nu = (6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}) / (370000 \text{ J/mol})$$

$$\nu = 9.34 \times 10^{14} \text{ /s} = c/\lambda$$

که در آن c سرعت نور است.

$$\lambda = (0.299 \times 10^9 \text{ m/s}) / (9.34 \times 10^{14} \text{ /s})$$

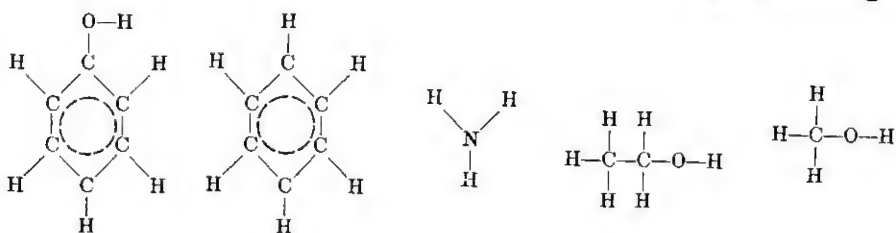
$$= 0.32 \times 10^{-6} \text{ m} (= 320 \text{ nm})$$

توضیح. این طول موج در گستره نور فرابنفش است. به همین دلیل نور فرابنفش می تواند سبب فاسد شدن پلاستیکهایی که پیوند کووالانسی C—C دارند، شود. ▲

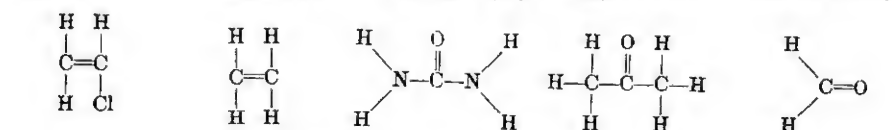
۳-۲ مولکولها

مولکول را می توان به عنوان گروهی از اتمها تعریف کرد که بین آنها پیوندی قوی برقرار است، اما پیوند این گروه با گروههای مشابه نسبتاً ضعیف است. نخستین مولکول مورد بحث F_2 است که در بخش قبل شرح داده شد. یادآوری می شود که برای شکستن پیوند کووالانسی بین دو اتم آن ۱۶۰ کیلوژول بر مول (تقریباً ۱۶۵ الکترون ولت برای هریک پیوند) انرژی لازم است (شکل ۲-۳-۳). در مقابل برای جدا کردن مولکولها و گازی شدن در هنگام جوش، تنها ۳ کیلوژول بر مول (۳۰۳ الکترون ولت برای هریک پیوند) کافی است.

معمولترین مثال در این مورد ترکیباتی مثل H_2O ، CO_2 ، CCl_4 ، O_2 ، N_2 ، و HNO_3 است مولکولهای کوچک دیگری نیز در شکل ۲-۳-۱ دیده می شود. در هریک از این مولکولها، پیوندهایی قوی اتمها را به هم متصل می کند که معمولاً پیوند کووالانسی است، گرچه پیوند یونی نیز معمول است. برخلاف نیرویی که اتمها را به هم نزدیک می کند، پیوند بین مولکولها ضعیف است و در نتیجه هر مولکول کم و بیش آزاد است که به طور مستقل عمل کند. این مطالب از حقایق زیر سرچشمه گرفته اند: (۱) در مقایسه با سایر مواد هریک از این ترکیبات مولکولی نقطه ذوب و نقطه جوش پایینی دارند؛ (۲) جامدات مولکولی نرم اند زیرا مولکولها با اعمال اندکی تنش روی هم می لغزند؛ (۳) مولکولهای می توانند به حالت مایع یا گاز باقی بمانند.



(الف) متانول (ب) اتانول (ج) آمونیاک (د) بنزن (ه) فنل



(و) فرم آلدهید (ز) استون (ح) اوره (ط) اتیلن (ی) وینیل کلرید

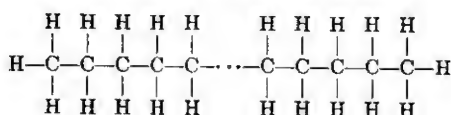
شکل ۲-۳-۱ مولکولهای آلی کوچک. هراتم کربن با چهار پیوند، هر نیتروژن با سه پیوند، هراکسیژن با دو پیوند، و هرهیدروژن یا کلر بایک پیوند احاطه شده است.

مولکولهایی که در بالا نام برده شد نسبتاً کوچک اند، مولکولهای دیگر از تعداد زیادی اتم تشکیل شده اند. مثلاً مولکول پنتانتری اکتان (که در شکل ۲-۳-۲ (ج) دیده می شود) بیش از ۱۰۰ اتم دارد و بعضی از مولکولها بیش از چند هزار اتم را شامل می شوند. در هر صورت چه مولکول کوچک باشد مثل CH_4 ، و چه بزرگتر از آنچه که در شکل ۲-۳-۲ (ج) نشان داده شده، تفاوت بین پیوندهای ددون مولکولی قوی و پیوندهای بین مولکولی ضعیفتر، هنوز وجود دارد.

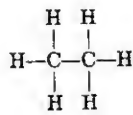
مواد دیگری از قبیل فلزات، MgO ، SiO_2 و پلاستیکهای فنل فرم آلدئید ساختار پیوسته سه بعدی با پیوند اصلی دارند. اختلاف ساختار بین مواد مولکولی و موادی که ساختار آنها در هر سه جهت پیوند اصلی دارد، موجب تفاوت اساسی در خواص می شود.

انرژی و طول پیوندها. استحکام پیوند بین اتمهای یک مولکول به نوع اتمها و به دیگر پیوندهای اطراف بستگی دارد. در جدول ۱-۳-۲ طول پیوند و انرژی برخی از زوج اتمهایی که معمولاً در ساختار مولکولی با آنها برخورد می کنیم، گردآوری شده است. انرژی ذکر شده در جدول، مقدار لازم برای شکستن یک مول (عدد آووگادرو) پیوند است. مثلاً برای شکستن $10^{24} \times 602 \times 10^3$ پیوند $\text{C}-\text{C}$ ، 3700000 ژول انرژی لازم است یا برای هر پیوند $(602 \times 10^3) / 3700000$ ژول. به همین ترتیب هنگام تشکیل یکی از این پیوندهای $\text{C}-\text{C}$ همان مقدار انرژی $(10^{18} \times 602 - \text{ژول})$ آزاد می شود، فقط علامت آن تغییر می کند.

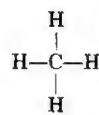
زاویه های پیوند. در بعضی ترکیبات کووالانسی اربیتالهای هیبریدی را می توان تشخیص داد و آن هنگامی است که اربیتالهای s و p ملغمه شده باشند. مهمترین هیبرید اربیتال sp^3 است که در شکل ۲-۲-۲ برای چهار پیوند کربن در الماس رسم شده و به جای اربیتالهای جداگانه s و p که در اتمهای تنها به وجود می آیند، [مثل اتمهای تنهای سدیم و فلورین در شکل ۲-۲-۱ (الف)]، چهار اربیتال مساوی تشکیل شده است. متان (CH_4) و کربن تتراکلرید (CCl_4) مانند الماس اربیتال sp^3 دارند که چهار اتم یکسان را به کربن مرکزی متصل می کند. بنابراین با فاصله های مساوی در اطراف کربن مرکزی قرار گرفته اند



(ج) $\text{C}_{35}\text{H}_{72}$ ، پنتانتری اکتان (یعنی ۳۵-آن)



(ب) اتان



(الف) متان

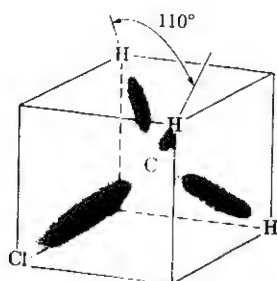
شکل ۲-۳-۲ مثالهایی از مولکولها. مولکولها گروههایی از اتمهایند. پیوندهای اصلی، اتمهای هر مولکول را در مجاورت هم نگه می دارد و نیروهای ضعیفتر فرعی موجب می شود که مولکولها یکدیگر را جذب کنند.

جدول ۲-۳-۱ انرژی و طول پیوندها

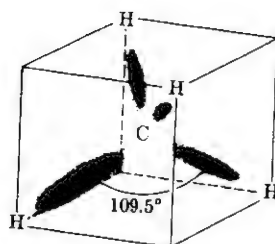
طول پیوند nm	انرژی پیوند*		پیوند
	kJ/mole	kcal/mole	
۰٫۱۵۴	۳۷۵**	۸۸**	C—C
۰٫۱۳	۶۸۰	۱۶۲	C=C
۰٫۱۲	۸۹۰	۲۱۳	C≡C
۰٫۱۱	۴۳۵	۱۰۴	C—H
۰٫۱۵	۳۰۵	۷۳	C—N
۰٫۱۲	۳۶۰	۸۶	C—O
۰٫۱۲	۵۳۵	۱۲۸	C=O
۰٫۱۲	۴۵۰	۱۰۸	C—F
۰٫۱۸	۳۴۰	۸۱	C—Cl
۰٫۱۰	۵۰۰	۱۱۹	O—H
۰٫۱۵	۲۲۰	۵۲	O—O
۰٫۱۶	۳۷۵	۹۰	O—Si
۰٫۱۰	۴۳۰	۱۰۳	N—H
۰٫۱۲	۲۵۰	۶۰	N—O
۰٫۱۲	۱۶۰	۳۸	F—F
۰٫۰۷۴	۴۳۵	۱۰۴	H—H

* مقادیر تقریبی. این مقادیر با تغییر نوع پیوندهای مجاور تغییر می‌کند. مثلاً متان (CH_4) برای پیوند C—H خود مقدار بالا را دارد ولی در CH_3Cl انرژی پیوند C—H ۵٪ از این مقدار کمتر است و در CHCl_3 ۱۵٪ کمتر.

** در تشکیل پیوند تمام این مقادیر منفی است، (انرژی آزاد می‌شود) و برای شکستن پیوند مثبت است (انرژی می‌گیرد).



(ب)

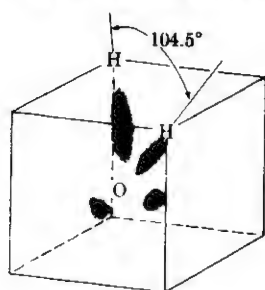


(الف)

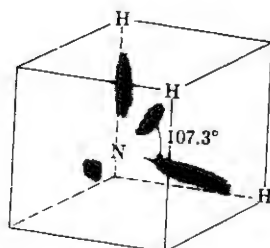
شکل ۳-۳-۲ زاویه‌های پیوند. (الف) متان، CH_4 ، نسبت به شش زاویه به‌طور یکسان 109.5° درجه تقارن دارد؛ (ب) کلرومتان، CH_3Cl ، که کج و نامتقارن است.

و با یکدیگر زوایای 109.5° درجه می‌سازند. * از نظر هندسی مثل آن است که یک کربن در مرکز مکعبی قرار گیرد و اربیتالها به‌طرف چهار گوشه از ۸ گوشه مکعب کشیده شده باشند [شکل ۳-۳-۲ (الف)]. با این حال اگر اربیتالها اتمهای غیر مشابهی را به کربن مرکزی پیوند دهند، همان‌طور که برای CH_3Cl دیده می‌شود [شکل ۳-۳-۲ (ب)]. زوایا اندکی تغییر خواهد کرد.

اعوجاج بیشتر در اربیتالهای هیبریدی هنگامی اتفاق می‌افتد که بعضی از الکترونها به‌جای شرکت در پیوند کووالانسی، به‌صورت جفت الکترون تنها وجود داشته باشند. این امر به‌ویژه در مورد H_2O و NH_3 (شکل ۳-۳-۲) که مقادیر میانگین زمانی آنها



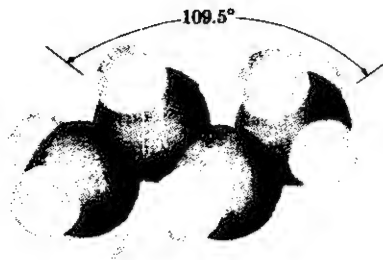
(ب)



(الف)

شکل ۳-۳-۲ زاویه‌ای پیوند. (الف) آمونیاک، NH_3 ؛ و (ب) آب. زوایایی بین 109.5° شکل ۳-۳-۲ (الف) و 90° دارد. آمونیاک یک جفت الکترون تنها و آب دو جفت دارد.

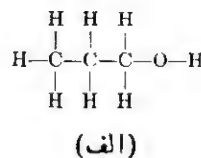
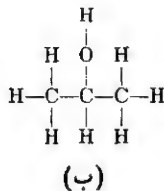
* زاویه $\text{H}-\text{C}-\text{H}$ در CH_4 به‌دلیل ارتعاشات گرمایی دائماً در تغییر است و 109.5° درجه میانگین زمانی آن است.



شکل ۲-۳-۵ زوایای پیوند (بوتان). با وجود آنکه معمولاً زنجیرها را به صورت خط راست می کشیم [شکل ۲-۳-۲ (ج) و ۲-۳-۷ (ب)] زاویه پیوند C-C-C حدود ۱۰۹ درجه است.

به ترتیب ۱۰۷۳ و ۱۰۴۵ درجه است آشکار می شود. یکی از زوایای پیوندی که غالباً در مطالعه مواد بر آن برخورد می کنیم، زاویه C-C-C در زنجیر هیدروکربنها است (شکل ۲-۳-۵). اگرچه بر حسب وجود هیدروژن یا رادیکال جانبی دیگر (مقدار این زاویه اندکی تغییر می کند) ولی می توان زاویه C-C-C را نزدیک به ۱۰۹ درجه فرض کرد.

ایزومرها. در مولکولهایی که ترکیب یکسان دارند بیش از يك آرایش اتمی ممکن است. شکل ۲-۳-۶ این امر را برای الکل پروپیل والکل ایزوپروپیل نشان می دهد. در ترکیب شیمیایی معین، ساختارهای مولکولی متفاوت ایزومر نامیده می شوند و از آنجا که این تغییرات ساختاری روی قطبیت مولکولی اثر می گذارد (بخش ۲-۴)، در خواص حاصل نیز مؤثر است. مثلاً دمای ذوب و جوش الکل پروپیل به ترتیب 127°C و 97.2°C است، در حالی که برای الکل ایزوپروپیل این دماها برابرند با 89°C و 82.3°C .



شکل ۲-۳-۶ ایزومرهای پروپانول. (الف) الکل پروپیل معمولی؛ (ب) الکل ایزوپروپیل مولکولها ترکیب یکسان و ساختارهای متفاوت دارند. در نتیجه خواص آنها متفاوت است. آن را با چند شکلی مواد بلوری (بخش ۳-۴) مقایسه کنید.

آشنایی با مواد: مروری بر پیوندهای شیمیایی ۶۳

مثال ۲-۳-۱ از تبدیل ۷۰ گرم اتیلن [شکل ۲-۳-۷ (الف) به پلی اتیلن [شکل ۲-۳-۷ (ب)] چقدر انرژی آزاد می‌شود؟

حل: هر مولکول C_2H_4 افزوده شده یک پیوند $C=C$ را می‌شکند و دو پیوند $C-C$ تشکیل می‌دهد. با استفاده از جدول ۲-۳-۱:

$$\frac{+680000 \text{ J}}{\text{مولکول } 10^{24} \times 0.602} - \frac{2(370000 \text{ J})}{\text{مولکول } 10^{24} \times 0.602} = -996 \times 10^{-20} \text{ J}/C_2H_4$$

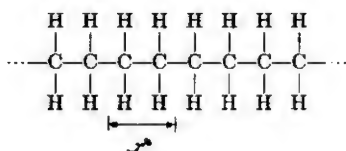
$$70 \text{ g } (0.602 \times 10^{24} \text{ amu/g}) / (28 \text{ amu}/C_2H_4) = 1.5 \times 10^{24} C_2H_4$$

$$(-996 \times 10^{-20} \text{ J}/C_2H_4)(1.5 \times 10^{24} C_2H_4) = -150000 \text{ J}$$

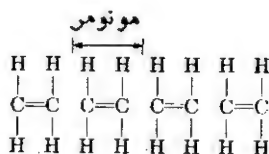
یا

$$-150000 \text{ J } (0.239 \text{ cal/J}) = -36 \text{ kcal}$$

توضیح. به‌طور قراردادی انرژی لازم با علامت (+) و انرژی آزاد شده با علامت (-) مشخص می‌شود. واکنش شکل ۲-۳-۷ اساس ساخت مولکولهای نوع وینیل است که در پلاستیکها مصرف می‌شوند. (فصل ۷).



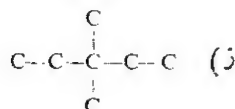
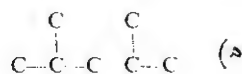
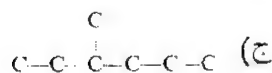
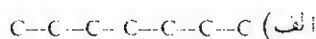
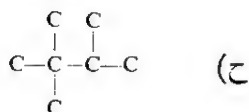
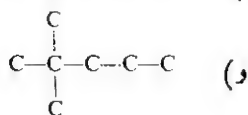
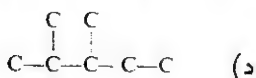
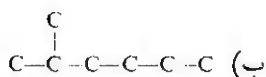
(ب)



(الف)

شکل ۲-۳-۷ پلی‌مر کردن افزایشی اتیلن. (الف) مونومرهای اتیلن؛ (ب) پلی‌مر با تعدادی مر یا واحد C_2H_4 . پیوند دوگانه اتیلن شکسته می‌شود تا دو پیوند ساده تشکیل شود و مرهای مجاور را اتصال دهد.

مثال ۲-۳-۲ ایزومرهای مختلف هپتان، C_7H_{16} را با شکل نشان دهید (فقط اتمهای کربن را نشان دهید)



توضیح. سایر آرایشها مثل $\begin{array}{c} \text{C} \\ | \\ \text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C} \\ | \\ \text{C} \end{array}$ مشابه یکی از صورتهای بالاست (در این مورد شکل (ز)).

▲

□ ۲-۴ نیروهای پیوندی فرعی *

سه نوع پیوندی که در بخش (۲-۲) بررسی شد همگی پیوندهای اصلی نسبتاً قوی اند که اتمها را در مجاورت هم نگه می دارند. پیوندهای ضعیفتر فرعی نیز سبب جاذبه بین اتمی می شوند و با وجود آنکه چندمکانیسم مختلف دارند، به طور کلی به عنوان نیروهای واندروالس شناخته شده اند. اگر نیروهای واندروالس در بعضی موارد تنها نیروهای اعمال شونده نبودند، از مطرح کردن آنها چشمپوشی می کردیم.

در گاز نجیبی مثل هلیم اربیتال اولیه با دو لکترون پر شده است؛ و در سایر گازهای نجیب مثل نئون و آرگون اربیتالهای ظرفیتی با هشت الکترون تکمیل شده اند. در این حالات پایدار هیچ یک از پیوندهای اصلی نمی توانند مؤثر باشند، زیرا پیوندهای یونی، کووالانسی و فلزی هر سه به تنظیم الکترونهای ظرفیتی نیاز دارند. در نتیجه اتمهای این گازهای نجیب نسبت به هم جاذبه اندکی دارند و بجز در چند مورد استثنایی، در دماهای معمولی به صورت تک اتمی باقی می مانند. تنها در دماهای فوق العاده پایین که ارتعاشات گرمایی کاهش یافته است این گازها متراکم می شوند [جدول ۲-۴-۱ (الف)] و همین تراکم است که نشان می دهد بین اتمها جاذبه ضعیفی وجود دارد که آنها را به طرف یکدیگر می کشاند.

شواهد دیگری وجود دارد که نشان می دهد بین مولکولهای جدول ۲-۴-۱ (ب) نیز چنین جاذبه های ضعیفی وجود دارد. همان طور که قبلاً گفته شد، اتمهای این گازها مدار ظرفیتی خود را با پیوند کووالانسی درون مولکول کامل می کنند. تراکم چنین مولکولهایی تنها در صورتی میسر است که انرژی ارتعاشات گرمایی به اندازه کافی کاهش یابد و نیروهای ضعیف واندروالس فعال شوند.

جدول ۲-۴-۱ دمای ذوب و جوش گازها. (دمای مطلق)

(الف) گازهای نجیب			(ب) مولکولهای ساده		
گاز	دمای ذوب K	دمای جوش K	مولکول	دمای ذوب K	دمای جوش K
قرینه					
He	۰٫۹۶*	۴٫۲۵	H _۲	۱۴٫۰۲	۲۱
Ne	۲۴٫۵	۲۷	N _۲	۶۳	۷۸
Ar	۸۴	۸۷٫۵	O _۲	۵۵	۹۰
Kr	۱۱۶	۱۲۰	CH _۴	۸۸	۱۴۵
Xe	۱۶۱	۱۶۶	CCl _۴	۲۵۰	۳۴۹
Rn	۲۰۲	۲۱۱	C _۲ H _{۱۰}	۱۳۵	۲۷۴
قطبی					
			NH _۳	۱۹۵	۲۴۰
			CH _۳ Cl	۱۱۳	۲۵۹
			H _۲ O	۲۷۳	۳۷۳

* نقطه ذوب در فشار ۲۶ اتمسفر. در فشار يك اتمسفر تنها نزدیک به صفر درجه کلوین (۲۷۳٫۱۶-°C) هلیوم به صورت مایع باقی می ماند.

دوقطبیهای القایی. به استثنای سه مورد آخر، تمام گازها و مولکولهای جدول ۲-۴-۱ متقارن اند یعنی در هر دو رده طولانی مرکز بارهای مثبت پروتونها و مرکز بارهای منفی الکترونها در مرکز مولکول (یا اتم گاز نجیب) واقع است. اما در لحظاتی ممکن است حرکات الکترونی و ارتعاشات اتمی این تقارن الکتریکی را برهم زنند. در این صورت دوقطبی الکتریکی کوچکی حاصل می شود. در هر کسری از ثانیه* مراکز بارهای مثبت و منفی برهم منطبق نیستند، بنابراین دوقطبی الکتریکی به وجود خواهد آمد و يك انتهای مولکول را مثبت و انتهای دیگرش را منفی خواهد کرد. میدان الکتریکی اندکی که به وجود می آید به نوبه خود موجب جابه جایی الکترونها در مولکولهای مجاور و ایجاد دوقطبی در آنها می شود، ولی نیروهای جاذبه حاصل ضعیف اند. طبق داده های جدول ۲-۴-۱

* بین ۱۰-۱۶ تا ۱۰-۱۲ ثانیه.

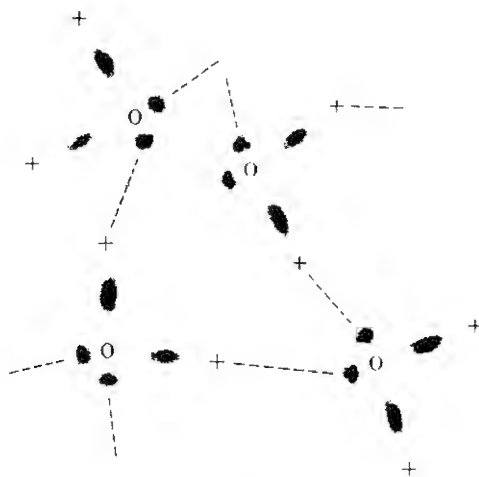
این گازها متراکم می‌شوند، لیکن تا قبل از رسیدن به دماهای پایین این عمل صورت نمی‌گیرد.

مولکولهای قطبی. در مولکولهای غیرمتقارن نظیر NH_3 ، CH_3Cl و H_2O همیشه مراکز بارهای مثبت و منفی بر یکدیگر منطبق نیستند. شکل ۲-۳-۴ این قطبیت را برای آمونیاک (NH_3) به بهترین وجه نشان می‌دهد. سه هسته هیدروژن که در واقع فقط پروتون (+) تنها هستند در بالا طرف راست واقع‌اند، زوج الکترون تنها، انتهای دیگر مولکول را منفی کرده است. از آنجا که جرم CH_4 و NH_3 تقریباً برابر است (به ترتیب ۱۶ و ۱۷ amu)، پیوند بین مولکولی آنها را می‌توان با توجه به نقاط ذوب و جوش آنها مقایسه کرد. جدول ۲-۴-۱ نشان می‌دهد که آمونیاک باید به دمای 240°K (-33°C) برسد تا ارتعاشات گرمایی پیوندهای بین مولکولی را کاملاً بشکند و تشکیل گاز دهد. در حالی که متان با مولکول متقارن و پیوند ضعیفتر در 145°K (-128°C) بخار می‌شود. در مقابلی CH_3Cl تا دمای 259°K (-14°C) تبخیر نمی‌شود [شکل ۲-۳-۳ (ب)]، زیرا کلر دارای تعداد زیادی الکترون است که با مرکز مولکول فاصله نسبتاً زیادی دارند و جاذبه‌ای قوی بین مولکولهای دو قطبی مجاور به وجود می‌آورد.

پل هیدروژنی. سومین نوع نیروی پیوندی و اندروالس در حقیقت حالت خاصی از مولکول قطبی است. با وجود این، پل هیدروژنی تقریباً قویترین پیوند فرعی است و غالباً دیده می‌شود. بنابراین توجه خاصی به آن شده و عنوان خاصی یافته است.

پروتون موجود در انتهای پیوند $\text{C}-\text{H}$ ، $\text{O}-\text{H}$ یا $\text{N}-\text{H}$ را الکترونها به طور کامل احاطه نکرده‌اند، در نتیجه این بار مثبت می‌تواند به وسیله الکترونها ظرفیتی مولکولهای مجاور جذب شود. پیوند حاصل که از نوع کوئنی است پل هیدروژنی نام دارد. مثال متداول آن آب است که در هر مولکول آن پروتون هیدروژن را زوج الکترونها تنهای اکسیژن در مولکول مجاور جذب می‌کند (شکل ۲-۴-۱). بیشینه انرژی این پیوند حدود 30 kJ/mole (7 kcal/mole) است و این در حالی است که (۱) بیشینه انرژی برای سایر پیوندهای و اندروالس 5 kJ/mole (و معمولاً $\gg 1 \text{ kJ/mole}$) است؛ و (۲) در پیوندهای اصلی چند صد کیلو ژول برای $10^{24} \times 6$ پیوند است (بخش ۲-۲).

شیمیدانها اظهار می‌دارند که تأکید بیش از حد به اهمیت پل هیدروژنی ضروری است. مثلاً مولکول آب که وزن مولکولی آن تنها ۱۸ amu است در بین موادی که وزن مولکولی کمتر از ۱۰۰ amu دارند بالاترین نقطه جوش را دارد. اگر نقطه جوش آب نظیر سایر مولکولهای سه‌چهار اتمی بود اقیانوسها وجود نداشتند و شرایط زمین و زیست به کلی دگرگون می‌شد. هنگام بررسی مواد خواهیم دید که پل هیدروژنی بر خواص پلاستیکها (فصل ۷) و بعضی سرامیکها (فصل ۸) نیز اثر دارد.



شکل ۱-۴-۲ پل هیدروژنی (در آب). هیدروژنی که در انتهای اربیتال قرار گرفته پروتون (+) فعال است و به وسیله زوج الکترونیهای تنهای مولکولهای دیگر آب جذب می‌شود. (به شکل ۲-۳-۴ (ب) رجوع کنید) پل هیدروژنی سبب می‌شود تا آب در بین موادی که وزن مولکولی پایینی (۱۸ amu) دارند بالاترین نقطه جوش را داشته باشد.

مثال ۱-۴-۲ هر بازوی OH مولکول آب دارای يك دوقطبی الکتریکی با گشتاوری برابر $5 \times 10^{-30} \text{ coul} \cdot \text{m}$ است. گشتاور دوقطبی هر مولکول چقدر است؟
 حل: دوقطبیهای مولکول آب زاویه 104.5° درجه می‌سازند (شکل ۲-۳-۴).

$$p = 2(5 \times 10^{-30} \text{ coul} \cdot \text{m}) \cos(104.5^\circ/2)$$

$$= 6 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$$

توضیح. گشتاور دوقطبی عبارت است از حاصل ضرب بار الکتریکی در فاصله بین مراکز بارهای مثبت و منفی. ▲

مثال ۲-۴-۲ مولکول H_2O در هر اتم هیدروژن يك پروتون و در هر اتم اکسیژن هشت پروتون دارد. الف) مراکز بارهای مثبت و منفی چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟
 مولکول H_2O را می‌توان به سبب دو پروتون (H^+) دارای يك انتهای مثبت و به علت ۸ پروتون و مجموعه ده الکترون (O^{2-}) دارای يك انتهای منفی در نظر گرفت؟
 ب) دو انتهای دوقطبی توصیف شده چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟

حل: از مثال ۱-۴-۲، گشتاور دوقطبی ($p = Qd$) مولکول آب

$$6 \times 10^{-30} \text{ coul} \cdot \text{m}$$

است.

$$Qd = 10(0.16 \times 10^{-18} \text{ C})d = 6 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m} \quad (\text{الف})$$

$$d = (6 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}) / (0.16 \times 10^{-18} \text{ C})$$

$$= 3.75 \times 10^{-12} \text{ m} \quad (= 0.00375 \text{ nm})$$

$$Qd = 2(0.16 \times 10^{-18} \text{ C})d = 6 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m} \quad (\text{ب})$$

$$d = 1.9 \times 10^{-12} \text{ m} \quad (= 0.0019 \text{ nm})$$

توضیح. هر دو حالت حاکی از آن است که مراکز بارهای مثبت و منفی برهم منطبق نیستند. حالت اول ذرات بنیادی باردار (الکترون و پروتون) را در نظر می گیرند، حالت بعدی بارها را به اتمهای یونیده واگذار می کند. ▲

۲-۵ فواصل بین اتمی

با آنکه در مولکولهای دو اتمی پیوند و کوئوردیناسیون تنها مربوط به دو اتم است، بیشتر مواد شامل کوئوردیناسیون اتمهای بسیارند که ساختار مجتمعی تشکیل می دهند. در این مورد دو عامل فاصله بین اتمی و آرایش فضایی اتمها اهمیت دارد. در اینجا این عوامل به تفصیل بررسی می شوند.

نیروی جاذبه بین اتمها، که در بخش قبل از آن صحبت کردیم، اتمها را به طرف یکدیگر می کشد، اما چه عاملی از نزدیکی بیشتر اتمها به یکدیگر جلوگیری می کند؟ از شکلها و مباحث گذشته آشکار است که اطراف هسته هر اتم با «فضای» خالی احاطه شده است. حرکت نوترونها در میان سوخت و مواد دیگر رئاکتور اتمی، وجود این فضای خالی را اثبات می کنند. نوترونها قبل از توقف می توانند از میان اتمهای زیادی بگذرند (شکل ۶-۹-۱ را ببینید).

فضای بین اتمها از آنجا به وجود می آید که علاوه بر نیروی جاذبه ای که در بخشهای ۲-۲ و ۴-۲ شرح داده شد، نیروهای دافعه نیز بین اتمها وجود دارد. اصولاً علت دافعه متقابل این است که نزدیک شدن دو اتم تعداد زیادی الکترون را در موقعیت برهم کنش قرار می دهد. فاصله تعادلی آن فاصله ای است که در آن نیروهای جاذبه و دافعه باهم برابرند. تشابهی بین فاصله بین اتمی و فاصله بین دو آهنربای حلقه ای شکل ۲-۵-۱ می توان یافت. (در این مثال، آهنرباها چنان قرار گرفته اند که یکدیگر را به جای جذب، دفع کنند). البته نیروها در این مورد مشابه با نیروهای بین اتمها نیست ولی اصول تعادلها را نیرو قابل مقایسه است. حلقه آهنربای بالایی تحت نیرویی (گرانشی) به طرف آهنربای پایینی (که در این حالت در کف ظرف تثبیت شده است) حرکت می کند. چون نیروی



شکل ۱-۵-۲ موازنه نیروها (آهنرباهای حلقه‌ای سرامیکی). نیروی گرانشی، حلقه بالایی را به طرف پایین می‌کشد و دافعه مغناطیسی به طرف بالا به آن نیرو وارد می‌کند. در حالت تعادل فاصله معینی بین دو حلقه باقی می‌ماند. (البته در این مثال نیروها شبیه نیروهای بین اتمها نیست. ولی اصول آن قابل مقایسه است.)

گرانشی در فواصلی که در اینجا مطرح است ثابت می‌ماند، آهنربای بالایی پایین می‌آید و به نقطه‌ای می‌رسد که با نیروی مغناطیسی مساوی ولی در جهت مخالف دفع می‌شود و نقطه تعادل حاصل می‌شود زیرا افزایش نیروی دافعه تابع معکوسی از فاصله است. توضیح آنکه بین آهنرباها فضایی باقی خواهد ماند (ماده غیرمغناطیسی می‌تواند در این فضا حرکت کند، درست مانند نوترون (نوترون بار ندارد) که می‌تواند میان اتمهای جسم جامد حرکت کند).

نیروهای کولنی. برای نشان دادن موازنه بین نیروهای جاذبه و دافعه مواد، پیوند یونی به کار می‌رود. نیروی کولنی F_C که بین دو بار نقطه‌ای به وجود آمده است به مقدار بارها Z_1q و Z_2q ، و فاصله بین آنها، a_{1-2} ، بستگی دارد

$$F_C = \frac{-k_e(Z_1q)(Z_2q)}{a_{1-2}^2} \quad (1-5-2)$$

Z ظرفیت (+ یا -) و q برابر با 1.6×10^{-19} کولن است. وقتی یونهای نزدیک به هم را بررسی می‌کنیم، ثابت تناسب k_e به واحدهای مورد استفاده بستگی دارد.*

* در دستگاه SI، k_e برابر $9 \times 10^9 \text{ V} \cdot \text{m/C}$ است، زیرا $k_e = 1/4\pi\epsilon_0$.

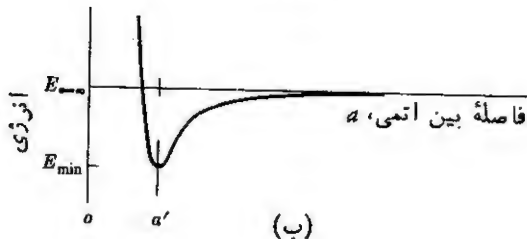
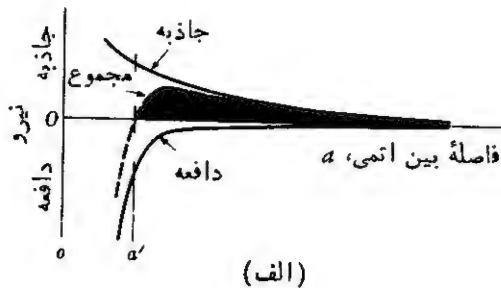
نیروهای دافعه الکترونی. نیروی دافعه بین میدانهای الکترونی دو اتم یا یون نیز تابع معکوسی از زمان است، ولی با نمای بیشتر

$$F_R = \frac{-bn}{a_1^{n+1}} \quad \square \quad (2-5-2)$$

b و n ثابتهای تجربی اند و n برای مواد جامد یونی حدود ۹ است. با مقایسه $F_C \propto a^{-2}$ و $F_R \propto a^{-10}$ ، نتیجه می شود که در فواصل اتمی زیاد نیروهای جاذبه و در فواصل اتمی کم نیروهای دافعه غالب خواهند بود [شکل ۲-۵-۲ (الف)]. فاصله تعادلی، $o-a'$ ، در صورتی حاصل می شود که

$$F_C + F_R = 0 \quad (3-5-2)$$

برای جدا کردن اتمها از یکدیگر نیروی کششی لازم است تا بتواند بر جاذبه بین اتمها غلبه کند، و برعکس برای نزدیک کردن اتمها به یکدیگر باید نیروی فشاری به آنها وارد کرد تا دافعه الکترونی را که هر لحظه افزایش می یابد، خنثی کند. هر جفت اتم یا یون معین، فاصله تعادلی ویژه ای دارد. اگر دما و سایر عوامل کنترل



شکل ۲-۵-۲ فواصل بین اتمی. (الف) فاصله تعادلی $o-a'$ فاصله ای است که در آن نیروهای جاذبه و دافعه مساوی اند؛ (ب) کمترین انرژی پتانسیل نیز در فاصله اتمی $o-a'$ ظاهر می شود. از آنجا که $E = \int F da$ ، ناحیه سایه زده در (الف) برابر عمق چاه انرژی در (ب) است.

شوند به کمک اشعه ایکس می توان آن را تا پنج رقم با معنی تعیین کرد (فصل ۳). برای کم یا زیاد کردن این فاصله به اندازه یک درصد، نیروی زیادی لازم است (با توجه به مدول یانگ این تنش برای آهن برابر 2000 MPa است)، و به این دلیل در بسیاری موارد اگر استحکام یا آرایش اتمها مطرح باشد، از گلوله های سخت به عنوان الگوی اتمی استفاده می شود.*

انرژی پیوند. مجموع دو نیروی فوق اساس محاسبه انرژی پیوند را فراهم می کند [شکل ۲-۵-۲ (ب)]. چون انرژی عبارت است از حاصلضرب نیرو در فاصله، داریم

$$E = \int_{\infty}^{\infty} (F_C + F_R) da \quad (2-5-4)$$

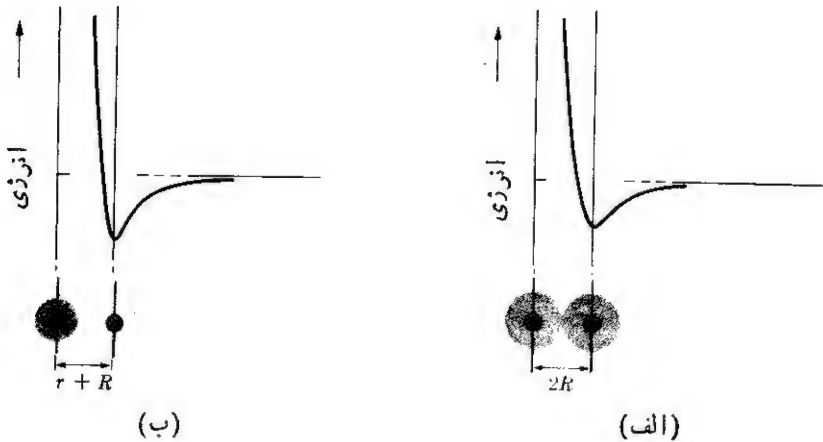
فاصله اتمی بینهایت را به عنوان مبدأ انتخاب می کنیم، $E_{\infty} = 0$. با نزدیک شدن اتمها به یکدیگر انرژی برابر با مساحت سطح سایه زده شکل ۲-۵-۲ (الف) آزاد می شود. مقدار این انرژی آزاد شده در شکل ۲-۵-۲ (ب) دیده می شود. توجه داشته باشید که کمینه انرژی در فاصله $a' - o$ است که در آن $F = 0 = dE/da$ ، زیرا برای نزدیکتر کردن اتمها به یکدیگر انرژی لازم است. عمق این چاه انرژی، یعنی $E_{\infty} - E_{\min}$ ، انرژی پیوند را نشان می دهد، زیرا وقتی دو اتم در کنار یکدیگر (در صفر مطلق) قرار گیرند این مقدار انرژی آزاد می شود (-). جدول ۲-۳-۱ چنین مقادیری را برای پیوندهای کووالانسی ارائه می کند.**

طرحواره هایی که در شکل ۲-۵-۲ دیده می شوند درمبحث متنوعی در بخشهای آینده مورد استفاده قرار می گیرند، به ویژه در بررسی ضریب الاستیک، انبساط گرمایی، استحکامات نظری، دماهای ذوب و تبخیر و...

شعاع اتمی و شعاع یونی. فاصله تعادلی بین مراکز دو اتم همسایه جمع دو شعاع آنهاست (شکل ۲-۵-۳). مثلاً برای آهن در دمای اتاق، فاصله مراکز دو اتم از یکدیگر 248.2 nm (یا 2.482 \AA) است و چون دو اتم یکسانند، شعاع اتم آهن 124.1 nm خواهد بود.

* الگوی گلوله های سخت برای تمام توضیحات مربوط به رفتار اتمی مناسب نیست. مثلاً نوترون (که بار ندارد) می تواند در فضای بین اتمها حرکت کند بدون اینکه تحت تأثیر نیروهای دافعه الکترونی قرار گیرد. به همین ترتیب، هسته اتمی می تواند با افزایش انرژی گرمایی، شدیدتر ارتعاش کند و فقط در فواصل متوسط بین اتمی اندکی انبساط داشته باشد. بالاخره با تغییرات لحظه ای در میدانهای الکتریکی، اتمها می توانند درون جسم جامد از کنار یکدیگر عبور کنند (به نفوذ، در فصل ۴ مراجعه کنید).

** نیروهای جاذبه در پیوندهای کووالانسی از نیروهای جاذبه کولنی ارائه شده در معادله (۲-۵-۱) پیچیده ترند. اما در عین حال چاه انرژی قابل مقایسه ای وجود دارد.



شکل ۲-۵-۳ طول پیوند. فاصله دو اتم مجاور در نقطه‌ای که انرژی کمینه است، طول پیوند را نشان می‌دهد و برابر با جمع دو شعاع است. (الف) در فلزات خالص شعاع همه اتمها یکسان است؛ (ب) در جامدات یونی شعاعها مختلف است زیرا دو یون مجاور هیچگاه یکسان نیستند.

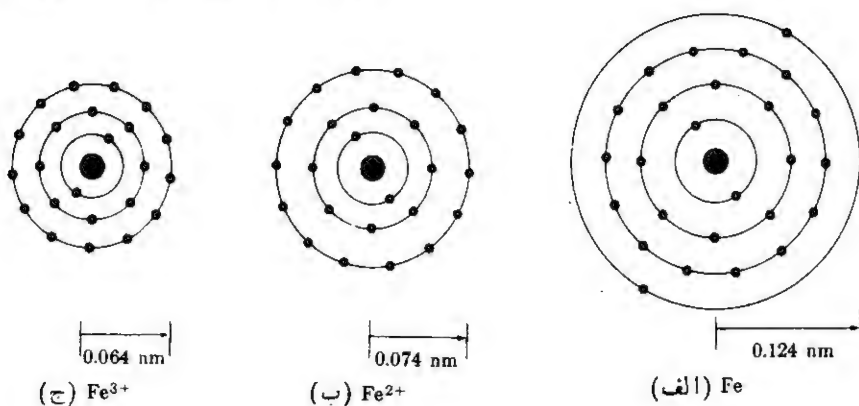
چندین عامل می‌تواند فاصله بین مراکز اتمها را تغییر دهد. اولی دماست. هر گونه افزایش در انرژی، اگر بالاتر از نقطه کمینه‌ای باشد که در شکل ۲-۵-۲ (ب) دیده می‌شود، فاصله متوسط را افزایش می‌دهد و این به دلیل شکل نامتقارن دره انرژی است. افزایش فاصله متوسط بین اتمها، انبساط گرمایی مواد را توجیه می‌کند.

ظرفیت یونی نیز بر فاصله بین اتمی اثر دارد. شعاع یون آهن دو ظرفیتی (Fe^{2+})، 0.74 nm است که از شعاع اتم آهن فلزی کمتر است [جدول ۲-۵-۱ و پیوست (ب)*]، چون الکترون دو ظرفیتی خارجی یون آهن (شکل ۲-۵-۲)، خارج شده‌اند ۲۴ الکترون باقیمانده به طرف هسته، که هنوز ۲۶ بار مثبت دارد، کشیده می‌شوند. فاصله بین اتمی هنگامی کمتر می‌شود که الکترون دیگری از مدار خارج و یون فریک (Fe^{3+}) تولید شود. شعاع یون در این حالت 0.64 nm است که تنها نصف شعاع آهن فلزی است.

یون منفی، بزرگتر از اتم مربوط به آن است، زیرا تعداد الکترونهاي احاطه کننده هسته از تعداد پروتونهای درون هسته بیشتر است و الکترونهاي اضافه به اندازه الکترونهاي اولیه به هسته جذب نمی‌شوند.

سومین عامل مؤثر بر اندازه اتم یا یون، تعداد اتمهای مجاور است. وقتی اتم آهن با هشت اتم دیگر آهن در تماس باشد، که آرایش عادی آهن در دمای اتاق است، شعاع

* شعاعهای فلزی به کار رفته در این کتاب از کتاب راهنمای فلزات ASM استخراج شده‌اند. شعاعهای یونی بر اساس الگوی آرنس (Ahrens) است.



شکل ۲-۵-۴ اندازه اتمی و یونی (طرحواره). الف) تعداد پروتونها در اتم و یون آهن یکسان است (۲۶)؛ ب) با خارج شدن دو الکترون، ۲۴ الکترون باقیمانده و یونهای منفی مجاور به طرف ۲۶ پروتون هسته کشیده شده به آن نزدیک می‌شوند؛ ج) ۲۳ الکترون یون فریک با هم به هسته نزدیک‌ترند.

آن 124 nm را 124 nm است. اگر اتمها چنان قرار گیرند که هراتم آهن با دوازده اتم دیگر در تماس باشد شعاع هراتم اندکی افزایش می‌یابد و (تقریباً) به 127 nm می‌رسد. بنا براین هرچه اتمهای مجاور زیادتر باشند دافعه الکترونی اتمهای همسایه بیشتر است و در نتیجه فواصل بین اتمی نیز افزایش می‌یابد (جدول ۲-۵-۱).

معمولاً در موادی که پیوند کووالانسی دارند از شعاع اتمی صحبت نمی‌کنیم زیرا توزیع الکترونها ممکن است به صورت کروی نباشد (شکل ۲-۳-۳ الف). به علاوه در پیوندهای فضا و یژه (بخش ۲-۲) عاملی که کوئوردیناسیون اتمها را محدود می‌کند، اندازه اتم نیست بلکه تعداد جفت الکترونهای موجود است. در این صورت با کمک جدول ۲-۵-۱ می‌توان فواصل بین اتمی را با یکدیگر مقایسه کرد. در اتان با پیوند ساده $C-C$ ، فاصله بین اتمی برابر 154 nm بوده، در پیوند $C=C$ برابر 134 nm و در پیوند $C \equiv C$ برابر 122 nm است. البته چنین تغییراتی قابل پیش بینی است زیرا در پیوندهای چندگانه انرژی پیوند زیادتر است (جدول ۲-۳-۱).

□ **مثال ۲-۵-۱** MgO و $NaCl$ نظیر یکدیگرند، جز اینکه یونهای Mg^{2+} و O^{2-} دو ظرفیتی و Na^+ و Cl^- یک ظرفیتی‌اند. در نتیجه فاصله بین اتمی $Mg-O$ برابر 210 nm ولی فاصله بین اتمی $Na-Cl$ برابر 282 nm است. نیروهای جاذبه کولنی ($\leftarrow \rightarrow$) این دو جفت یون را در این دو فاصله، با هم مقایسه کنید.

حل: با استفاده از معادله (۲-۵-۱) و پانوشت مربوط به آن

$$F_{Mg \rightarrow O} = -(9 \times 10^9 \text{ V} \cdot \text{m/C}) \left(\frac{(+2)(-2)(0.16 \times 10^{-18} \text{ C})^2}{(0.21 \times 10^{-9} \text{ m})^2} \right)$$

$$= 2.09 \times 10^{-9} \text{ J/m}$$

جدول ۲-۵-۱ شعاع اتمی برخی از عناصر

عنصر	اتمه‌ای فلزی		یونها			پیوند کووالانسی	
	nm CN شعاع		ظرفیت CN* nm** شعاع			nm ، نصف فاصله پیوند	
کربن						تنها	۰۰۷۷
						دوتایی	۰۰۶۵
						سه تایی	۰۰۶
سیلیسیم			۴+	۶	۰۰۴۲	تنها	۰۱۱۷
			۴+	۴	۰۰۳۸		
اکسیژن			۲-	۸	۰۱۴۴	تنها	۰۰۷۵
			۲-	۶	۰۱۴۰	دوتایی	۰۰۶۵
			۲-	۴	۰۱۲۷		
			۲-	۲	~۰۱۱۴		
کلر			۱-	۸	۰۱۸۷		
			۱-	۶	۰۱۸۱	تنها	۰۰۹۹
سدیم	۸	۰۱۸۵۷	۱+	۶	۰۰۹۷		
منیزیم	۱۲	۰۱۶۱	۲+	۶	۰۰۶۶		
آلومینیم	۱۲	۰۱۴۳۱	۳+	۶	۰۰۵۱		
			۳+	۴	۰۰۴۶		
آهن	۸	۰۱۲۴۱	۲+	۶	۰۰۷۴		
	۱۲	~۰۱۲۷	۳+	۶	۰۰۶۴		
مس	۱۲	۰۱۲۷۸	۱+	۶	۰۰۹۶		

* CN = عدد کوئوردیناسیون، یعنی تعداد همسایه‌های مجاور، برای یونها

$$۱۲۱ R_{CN=۴} \approx R_{CN=۶} \approx ۰۰۹۷ R_{CN=۸}$$

** این مقادیر در سیستم‌های مختلف اندکی متفاوت است. بر اساس الگوی آرنس.

به همین ترتیب

$$F_{\text{Na} \rightarrow \text{Cl}} = 2.9 \times 10^{-9} \text{ J/m}$$

توضیح. در این فاصله‌های تعادلی، نیروهای دافعه (رابطه ۲-۵-۲) به ترتیب 2.9 nJ/m و -2.9 nJ/m خواهد بود. در این صورت با فرض $n=9$ از رابطه (۲-۵-۲) مقدار ثابت تجربی b برای NaCl و MgO به ترتیب Δ $0.4 \times 10^{-105} \text{ Jm}^9$ و $10^{-105} \text{ Jm}^9 \sim$ خواهد بود.

□ مثال ۲-۵-۲ انرژی پیوند $\text{O}^{2-} \rightarrow \leftarrow \text{Mg}^{2+}$ را با انرژی پیوند $\text{Cl}^{-} \rightarrow \leftarrow \text{Na}^{+}$ مقایسه کنید. با ترکیب روابط (۲-۵-۲) و (۱-۵-۲) و به دست آوردن رابطه (۲-۵-۲) و انتگرال گیری از ∞ تا a داریم

$$E = \frac{k_0 Z_1 Z_2 q^2}{a} + \frac{b}{a^n} \quad (2-5-5)$$

حل: با استفاده از داده‌های مثال ۲-۵-۱

$$E_{\text{Mg-O}} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ V} \cdot \text{m/C})(-4)(0.16 \times 10^{-18} \text{ C})^2}{0.21 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$+ \frac{0.4 \times 10^{-105} \text{ Jm}^9}{(0.21 \times 10^{-9} \text{ m})^9}$$

$$= -4.4 \times 10^{-18} \text{ J} + 0.5 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$= -3.9 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$E_{\text{Na-Cl}} = -0.8 \times 10^{-18} \text{ J} + 0.1 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$= -0.7 \times 10^{-18} \text{ J}$$

توضیح. چون مبدأ انرژی در فاصله بینهایت است به جای از a تا ∞ ، حدود انتگرال از ∞ تا a است. منفی بودن این مقادیر نشان می‌دهد که هنگام نزدیک شدن دو یون به یکدیگر انرژی آزاد می‌شود. در این گستره انرژی معمولاً الکترون ولت (eV) به کار می‌رود (هر ژول برابر با $6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$ است)؛ بنابراین دو انرژی محاسبه شده به ترتیب -2.4 eV و -4.4 eV می‌شود. Δ

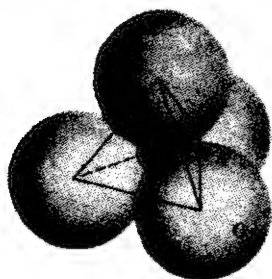
۲-۶ عدد کوئوردیناسیون

بیشتر بحثهای قبلی پیرامون ترکیبات دو اتمی، که فقط شامل دو اتم اند، دور می‌زد، اما

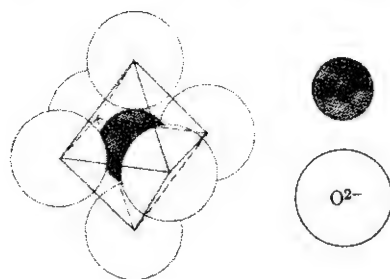
چون در بیشتر مواد مهندسی آنها به صورت گروههای چندتایی همسایه شده‌اند باید به گروه چند اتمیها توجه کرد. به این دلیل هنگام بررسی پیوند آنها در مواد، صحبت از عدد کوئوردیناسیون به میان می‌آید. عدد کوئوردیناسیون، CN، تعداد همسایه‌های درجه اول اتم است بنابراین در شکل ۲-۳-۳ عدد کوئوردیناسیون کربن چهار است، در مقابل هیدروژنها تنها يك همسایه بی‌واسطه دارند بنابراین عدد کوئوردیناسیون آنها يك است. در شکل ۲-۶-۱ عدد کوئوردیناسیون یون منیزیم، Mg^{2+} ، شش است.

دو عامل عدد کوئوردیناسیون اتم را کنترل می‌کند. اولی کووالانسی بودن است؛ به‌ویژه اینکه تعداد پیوندهای کووالانسی اطراف هر اتم، به تعداد الکترونهاى ظرفیتی آن بستگی دارد. به این ترتیب هالوژنها، که در گروه VII جدول تناوبی قرار دارند (شکل ۲-۱-۱)، تنها يك پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهند که در این صورت عدد کوئوردیناسیون آنها يك خواهد بود. اکسیژن و اعضای خانواده آنکه در گروه VI جدول واقع‌اند می‌توانند مولکول دو پیوندی تشکیل دهند و معمولاً بیشینه عدد کوئوردیناسیون آنها دو است (البته اکسیژن با يك پیوند دوتایی می‌تواند فقط با يك اتم دیگر کوئوردیناسیون شود). عناصر گروه نیتروژن چون در گروه V قرار دارند بیشینه عدد کوئوردیناسیون آنها سه است. و سرانجام کربن و سیلیسیم در گروه IV با دیگر آنها چهار پیوند به وجود می‌آورند و بیشینه عدد کوئوردیناسیون آنها چهار است [شکل ۲-۲-۴ (ب)].

عامل دومی که بر عدد کوئوردیناسیون اثر می‌گذارد فشردگی اتمی مؤثر است. از آنجا که هنگام نزدیک شدن یونهای ناهمنام انرژی آزاد می‌شود، ترکیبات یونی معمولاً عدد کوئوردیناسیون بالایی دارند، یعنی تعداد زیادی اتم می‌توانند همسایه باشند بی‌آنکه به دلیل مجاورت بارهای همنام نیروهای دافعه متقابل قوی ایجاد شده باشد. در شکل ۲-۲-۲ این مطلب را برای NaCl نشان دادیم، شکل ۲-۶-۱ (الف) نیز یونهای Mg^{2+} را







(ب)



(الف)

شکل ۲-۶-۱ عدد کوئوردیناسیون پیوندهای یونی. (الف) حداکثر شش یون اکسیژن (O^{2-}) می‌توانند هر یون منیزیم (Mg^{2+}) را احاطه کنند؛ (ب) عدد کوئوردیناسیون یون سیلیسیم، Si^{4+} ، بین یونهای اکسیژن (O^{2-}) تنها چهار است زیرا نسبت شعاعها کمتر از ۰.۴۱ است (جدول ۲-۶-۱).

جدول ۲-۶-۱ عدد کوئوردیناسیون بر حسب کمینه نسبت شعاعها

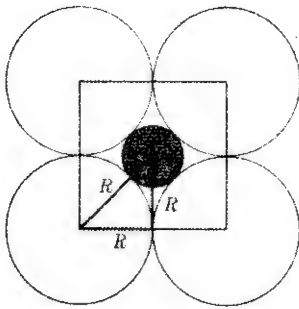
عدد کوئوردیناسیون	نسبت شعاعها r/R^*	هندسه کوئوردیناسیون
۳-۲	≥ 0.155	
۴	≥ 0.225	
۶	≥ 0.414	
۸	≥ 0.732	
۱۲	۱.۰	—

* r - شعاع کوچکتر؛ R - شعاع بزرگتر.

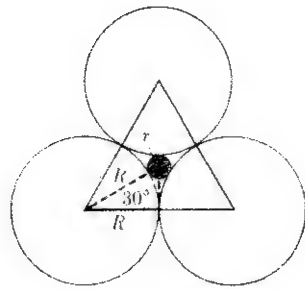
که با یونهای O^{2-} احاطه شده‌اند نشان می‌دهد. r ، شعاع یون منیزیم که برابر $nm\ 0.066$ است (جدول ۲-۵-۱ و پیوست ب) آنقدر بزرگ است که شش یون اکسیژن ($R = 0.170\ nm$) آن را احاطه می‌کنند بی آنکه یونهای منفی «تماس» مستقیمی باهم داشته باشند. نسبت شعاعها (r/R) برای داشتن شش همسایه بدون برخورد 0.41 است (جدول ۲-۶-۱). عدد کوئوردیناسیون شش ($CN = 6$) در ترکیبات یونی بسیار متداول است.

در فصل ۸ خواهیم دید که عدد کوئوردیناسیون سیلیسیم در SiO_2 چهار است ($CN = 4$). زیرا یون Si^{4+} کوچکتر از آن است که بتواند شش یون اکسیژن در همسایگی خود داشته باشد. نسبت r/R برای Si/O حدود 0.3 است که با پیش‌بینی جدول ۲-۶-۱ مطابقت دارد و در شکل ۲-۶-۱ (ب) نیز دیده می‌شود. عامل دیگری نیز عدد کوئوردیناسیون ۴ را برای سیلیسیم تأیید می‌کند و آن به اشتراك گذاشتن قابل توجه الکترون بین سیلیسیم و اکسیژن است (یادآوری می‌شود در آخرین پاراگراف کوتاه بخش ۲-۲ گفته شد که پیوندهای مخلوط نیز بسیار دیده می‌شوند). همچون کربن، در شرایط عادی بیشینه تعداد پیوند کووالانسی در سیلیسیم چهار است و این ترتیب، احتمال $CN = 4$ زیاده‌تر می‌شود.

مثال ۲-۶-۱ نشان دهید عدد 0.15 به نسبت کمینه برای عدد کوئوردیناسیون سه، است (جدول ۲-۶-۱).



(ب)



(الف)

شکل ۲-۶-۲ محاسبات عدد کوئوردیناسیون. (الف) عدد کوئوردیناسیون سه؛ (ب) عدد کوئوردیناسیون شش. [این شکل را با مثالها و شکل ۲-۶-۱ (الف) مقایسه کنید.]

حل: نسبت شعاعها برای آنکه عدد کوئوردیناسیون سه میسر باشد در شکل ۲-۶-۲ (الف) دیده می شود. در این صورت

$$\cos 30^\circ = \frac{R}{R+r} = 0.866$$

▲

$$\frac{r}{R} = \frac{1 - 0.866}{0.866} = 0.15$$

مثال ۲-۶-۲ نشان دهید کمیته نسبت شعاعها برای عدد کوئوردیناسیون شش، برابر با ۰.۴۱ است.

حل: کمیته نسبت شعاعها برای آنکه عدد کوئوردیناسیون شش میسر باشد در شکل ۲-۶-۲ (ب) دیده می شود در این رابطه،

$$(r+R)^2 = R^2 + R^2$$

$$r = \sqrt{2}R - R$$

و

$$\frac{r}{R} = 0.41$$

توضیح. در شکل ۲-۶-۱ (الف) پنجمین و ششمین یون در بالا و پایین یون مرکزی شکل ۲-۶-۲ (ب) واقع اند. ▲

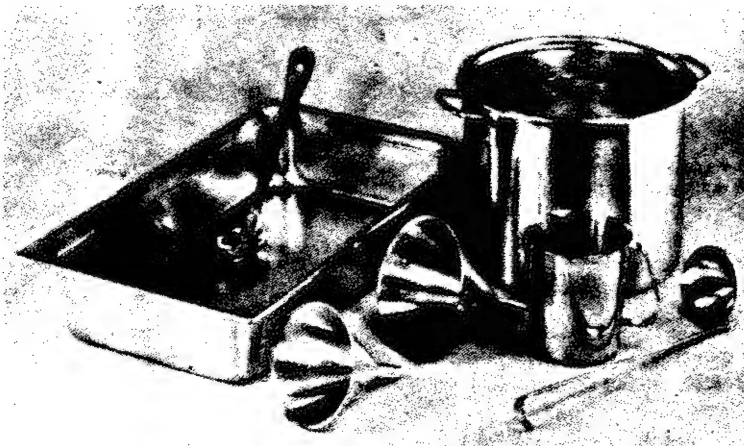
۲-۲ انواع مواد

مواد را در حالت کلی می‌توان به سه دسته اصلی، فلزات، پلی‌مرها (یا پلاستیکها) و سرامیکها تقسیم کرد. درحقیقت، این تقسیم‌بندی ایدئال است، زیرا بیشتر مواد خواص بینابینی دارند.

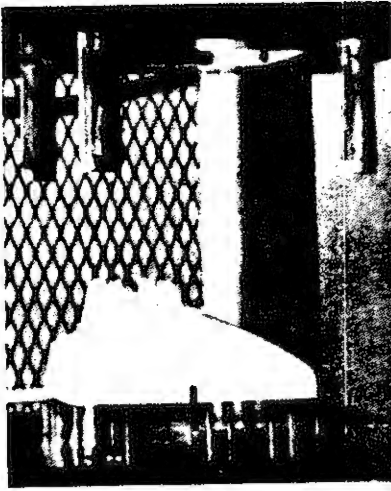
فلزات. از مشخصات اصلی این مواد بالا بودن ضریب رسانندگی گرمایی و الکتریکی است. فلزات درمقابل نور کدورتند، می‌توان آنها را صیقل داد و براق کرد (شکل ۲-۲-۱).

فلزات معمولاً، ولی نه همیشه، نسبتاً سنگین و شکل پذیرند. مشخصات فوق را چگونه می‌توان توجیه کرد؟ ساده‌ترین جواب آن است که فلز به علت وجود تعدادی الکترون آزاد، که می‌توانند اتمهای «مادر» خود را رها کنند، چنین خواصی دارد [شکل ۲-۲-۲ (ب)]. (برعکس در پلی‌مرها و سرامیکها الکترونها نمی‌توانند تا این حد آزاد باشند) حرکت این الکترونهای آزاد سبب انتقال بار الکتریکی و انتقال انرژی گرمایی در فلزات می‌شود. قابلیت انعکاس و کدر بودن فلزات نیز به دلیل عکس‌العمل الکترونهای آزاد درمقابل ارتعاشات الکترومغناطیسی در بسامدهای نوری است، و این نتیجه دیگری از آزادی نسبی الکترونها و جدا شدن آنها از اتم مادر است.

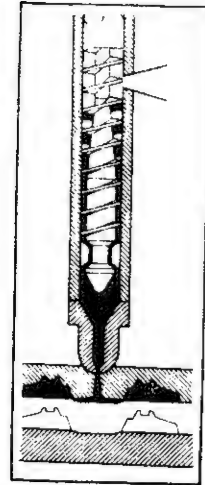
پلی‌مرها (معمولاً پلاستیک نامیده می‌شوند). پلاستیکها به خاطر چگالی کم و کار بردشان به عنوان عایق گرمایی و الکتریکی به خوبی شناخته شده‌اند. نور را خیلی کم منعکس می‌کنند



شکل ۲-۲-۱ مواد فلزی (لوازم آشپزخانه‌های صنعتی از فولاد زنگ‌نزن). فلزات برای فرایندهای لازم انعطاف‌پذیرند. جلا و رسانندگی فلزات ناشی از مشخصات الکترونی پیوندهای بین اتمی است.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۷-۲ محصولات پلاستیکی (گیرنده تلفن که در قالب تزریقی ساخته شده است).
 الف) پلاستیک گرم شده که نرم است با فشار از راهگاه به درون حفره قالب رانده می شود؛
 ب) محصول به دست آمده که پس از سرد شدن، صلب است تنها در یک مرحله تولید شده است.

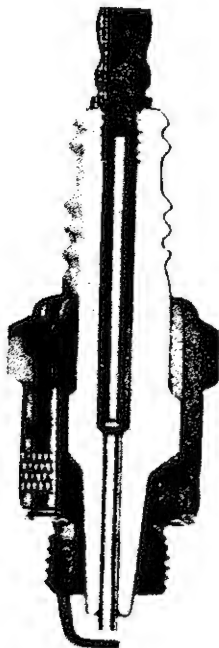
و شفاف یا نیمه شفاف اند (حداقل وقتی ضخامت کمی داشته باشند) سرانجام بعضی از آنها خمش پذیرند و به راحتی تغییر شکل می دهند. هنگام تولید از این مشخصه آخر استفاده می شود (شکل ۲-۷-۲).

برخلاف فلزات، که تعدادی الکترون مهاجر دارند، عناصر غیرفلزی در گوشه راست و بالای جدول تناوبی (شکل ۱-۱-۲) برای گرفتن الکترون جاذبه زیادی دادند و هر الکترون به یک یا یک جفت اتم ویژه می پیوندد. به این دلیل رسانندگی گرمایی و الکتریکی پلاستیکها بسیار محدود است زیرا تمام انرژی گرمایی باید از طریق ارتعاشات اتمی از نواحی گرم به سرد منتقل شود که فرایندی است به مراتب کندتر از انتقال الکترونی انرژی که در فلزات صورت می گیرد. به علاوه الکترونهای کم تحرک در پلاستیکها بهتر می توانند ارتعاشات خود را با ارتعاشات نور تطبیق دهند و بنابراین اشعه نور را جذب نمی کنند. موادی که منحصراً از عناصر غیرفلزی تشکیل شده اند، الکترون به اشتراك می گذارند تا مولکولهای بزرگ به وجود آورند. این مولکولها اغلب ماکرومولکول نامیده می شوند. در فصل ۷ خواهیم دید که این مولکولهای بزرگ از واحدهای تکراری یا هزهای زیادی تشکیل شده اند که واژه پلیمر از آن ناشی می شود.

سرامیکها. به عبارت ساده سرامیکها ترکیباتی اند که از عناصر فلزی و غیرفلزی تشکیل شده اند. مثالهای فراوانی در این مورد وجود دارد از جمله می توان سیمان سازنده بتن (حتی خود

سنگها)، شیشه، عایق چینی شمع (شکل ۲-۷-۳)، و اکسید سوخته‌های هسته‌ای مانند UO_2 را نام برد.

هر کدام از این مواد نسبتاً سخت و شکننده‌اند، در واقع سختی و تردی سرامیکها صفات عمومی آنهاست به علاوه بیش از فلزات یا پلی‌مرها در برابر گرما و محیطهای خورنده مقاوم‌اند. اساس این مشخصات نیز رفتار الکترونی اتمهای تشکیل‌دهنده است. عناصر فلزی طبق خصوصیات طبیعی خود الکترونها را آخرین مدار را رها می‌کنند و اتمهای غیر فلزی این الکترونها را می‌گیرند و نگه می‌دارند. در نتیجه این الکترونها بی‌حرکت می‌شوند، بنابراین مواد سرامیکی هم از نظر گرمایی و هم از نظر الکتریکی عایقهای خوبی هستند. از طرف دیگر یونهای فلزی مثبت (اتمهایی که الکترون از دست داده‌اند) و یونهای غیر فلزی منفی (اتمهایی که الکترون گرفته‌اند) به شدت یکدیگر را جذب می‌کنند. هر کاتیون (مثبت) را آنیونها (منفی) احاطه می‌کنند و برای جدا کردن آنها از یکدیگر انرژی زیاد (و بنابراین نیروی زیادی) لازم است. به این جهت سرامیکها ساخت (مقاوم از نظر مکانیکی)، دیرگداز (مقاوم از نظر گرمایی)، و بی‌اثر (مقاوم از نظر شیمیایی) خواهند بود.



شکل ۲-۷-۳ عایق سرامیکی (در شمع). جنس عایق عمدتاً Al_2O_3 است که ترکیبی از عناصر فلزی و غیر فلزی است.

مرور و بررسی مطالب

خواص کلی مواد

بعضی از خواص مواد را که در فصل اول آمد می توان از نظر کیفی به مشخصات پیوند اتمی، که در این فصل شرح داده شد، ارتباط داد.

۱. چگالی را جرم اتمی، شعاع اتمی و عدد کوئوردیناسیون کنترل می کند. عدد کوئوردیناسیون عامل بسیار مهمی است زیرا ضریب فشردگی را کنترل می کند.

۲. دمای ذوب و جوش را می توان به عمق دره انرژی در شکل ۲-۵-۲ (ب) ربط داد. در دمای صفر مطلق (در پایین دره) اتمها کمینه انرژی را دارند. با افزایش دما انرژی زیاد می شود تا جایی که اتمها می توانند از یکدیگر جدا شوند.

۳. استحکام نیز به ارتفاع منحنی کل نیرو یا منحنی مجموع شکل ۲-۵-۲ (الف) بستگی دارد. این نیرو در ارتباط با سطح مقطع، تنش لازم برای جدا شدن اتمها را به دست می دهد. (همچنان که در بخش ۶-۴ خواهیم دید به غیر از جدا شدن مستقیم اتمها، مواد می توانند طی فرایند دیگری تغییر شکل دهند. ولی تنش لازم برای این تغییر شکل نیز تحت کنترل نیروهای بین اتمی است.) از آنجا که عمیقتر بودن دره انرژی نیز نمایانگر نیروهای جاذبه بین اتمی بزرگتر است، موادی که نقطه ذوب بالایی دارند سخت ترند. مثلاً می توان Al_2O_3 و TiC را نام برد. به عکس موادی چون سرب، پلاستیکها، یخ و گریس که پیوندهای ضعیفی دارند نرم اند و نقطه ذوب پایینی دارند. البته در موادی که بیش از یک نوع پیوند دارند، مانند گرافیت و خاک رس، گاهی استثناهایی دیده می شود.

۴. مدول کشسانی را می توان از شیب منحنی کلی نیرو در شکل ۲-۵-۲ (الف) محاسبه کرد. زیرا در فاصله تعادلی که مجموع نیروها صفر است، dF/da تنش را به کرنش ربط می دهد، تا جایی که کرنش یا تغییر فاصله بین اتمی کمتر از یک درصد باشد مدول کشسانی عملاً ثابت خواهد بود. کشش یا فشار بیش از حد، مدول کشسانی را به ترتیب کم یا زیاد می کند.

۵. انبساط گرمایی موادی که ضریب فشردگی تقریباً یکسانی دارند، با دمای ذوب آنها نسبت عکس دارد. این رابطه غیر مستقیم از آنجا ناشی می شود که هر چه نقطه ذوب بالاتر باشد دره انرژی آن عمیقتر و بنابراین متقارنتر خواهد بود، در نتیجه به ازای هر تغییر معین در انرژی گرمایی، میانگین فاصله بین اتمی کمتر افزایش می یابد. مثالهایی از این قبیل فلزات بدین قرار است:

جیوه	دمای ذوب -39°C	،	ضریب انبساط خطی $40 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
سرب	دمای ذوب 327°C	،	ضریب انبساط خطی $29 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
آلومینیم	دمای ذوب 660°C	،	ضریب انبساط خطی $22 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
مس	دمای ذوب 1084°C	،	ضریب انبساط خطی $17 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
آهن	دمای ذوب 1538°C	،	ضریب انبساط خطی $12 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
تنگستن	دمای ذوب 3387°C	،	ضریب انبساط خطی $4.2 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$

۶. ضریب رسانندگی الکتریکی به ماهیت پیوندهای اتمی بستگی زیادی دارد. موادی که پیوند یونی یا کووالانسی دارند رساناهای بسیار ضعیفی اند زیرا الکترونها نمی توانند اتمهای میزبان خود را ترک کنند. از طرف دیگر، الکترونها آزاد فلزات هنگام اعمال پتانسیل به حرکت درمی آیند. در فصل ۵ درباره نیم رساناها بحث خواهد شد، ولی در اینجا می توان گفت آزادی حرکت الکترونهاشان میزان رسانندگی آنها را کنترل می کند.

۷. رسانندگی گرمایی در موادی که پیوند فلزی دارند زیاد است زیرا الکترونها آزاد انرژی گرمایی را نیز به خوبی انرژی الکتریکی، انتقال می دهند.

۸. در اینجا اثر ساختار اتمها روی خواص شیمیایی به طور کامل بیان نشده است. زیرا اختلاف شیمیایی عناصر، در درجه اول به تعداد الکترونها و ظرفیتی بستگی دارد، به علاوه تمام واکنشهای شیمیایی شامل تشکیل یا شکسته شدن پیوندهایند. تاجایی که به مواد مهندسی مربوط می شود مهمترین مسئله مواد مربوط به واکنشهای خوددگی (فصل ۱۲) است که در آن جدا شدن یون فلزی از فلز، شامل خروج الکترونها و ظرفیتی از مدار خارجی اتم، و پتانسیل یونش آن است.

در فصلهای بعد، اصولی که ربط دهنده خواص مواد مهندسی به ساختار موجودند را به تفصیل بررسی خواهیم کرد.

سؤالات تشریحی

۱. فرق بین عدد اتمی و جرم اتمی را ذکر کنید.
۲. توضیح دهید که چرا الکترونها می توانند فقط ترازهای برگزیده ای از انرژی را در اتم اشغال کنند و تمام ترازهای دیگر ممنوع اند.
۳. با مراجعه به شکل ۲-۱-۳، بر اساس معلومات شیمی خود، شکل مشابهی برای پتاسیم رسم کنید.
۴. با مراجعه به شکل ۲-۲-۱، شکل مشابهی برای KCl رسم کنید.
۵. الگوی «گلوله های سخت» برای اتمهای فلز و یونها کاربرد بسیار دارد ولی برای مولکولها کمتر به کار می رود. چرا؟
۶. الماس کوچکی 10^{20} اتم دارد. تعداد پیوندهای کووالانسی آن چقدر است؟
۷. سیلیسیم تترافلوئورید (SiF_4) ترکیبی پایدار است ولی دمای ذوب پایینی دارد ($-77^\circ C$). دلیل این امر را با تخمین زدن ماهیت پیوندهای آن شرح دهید (در صورت لزوم از شکل استفاده کنید).
۸. سولفور دی کلرید دارای جرم مولکولی 103 amu و نقطه جوش $59^\circ C$ است. با استفاده از نمایش نقطه ها، نموداری رسم کنید که نشان دهنده ساختار الکترونها و ظرفیتی این ترکیب باشد [شکل ۲-۲-۳ (الف)].
۹. با استفاده از نمایش نقطه ها، ساختار الکترونی یونها PO_4^{3-} ، SO_4^{2-} ، ClO_4^- و

SiO_4^{4-} را رسم کنید.

۱۵. شکل ۲-۳-۳ (ب) طرح‌وار رسم شده و در آن محور عمودی نشان‌دهنده انرژی است. انرژی متوسط الکترونهای ظرفیتی دو اتم مجزای فلوئور (طرف چپ پیکان) و مولکول F_2 (طرف راست پیکان) را معین کنید، چرا فلوئور مولکول تشکیل می‌دهد؟

۱۱. گشاور دوقطبی الکتریکی به ترتیب در مولکولهای HF ، HCl ، HBr و HI کم می‌شود. دلیلی برای آن ذکر کنید.

۱۲. نقطه جوش HBr (-67°C) بالاتر از HCl (-85°C) است، گرچه دوقطبی الکتریکی کوتاهتری دارد، در این باره شرح دهید.

۱۳. گوگرد می‌تواند مولکولهای حلقه‌ای با تقریباً هشت اتم تشکیل دهد. با استفاده از «نمایش نقطه‌ای الکترونها» پیوندها را نشان دهید. مولکول گوگرد چه نوع پیوندی دارد؟

۱۴. هیدروژن پراکسید (H_2O_2) پیوند کووالانسی دارد. ناپایدار است و به جای H و OOH به آسانی 2OH تشکیل می‌دهد. دلیل آن را ذکر کنید. یونهای OH حاصل، بسیار فعال‌اند. با استفاده از نقطه‌های نمایش‌دهنده الکترون دلیل آن را شرح دهید.

۱۵. انرژی پیوند $\text{C}\equiv\text{N}$ در جدول ۲-۳-۱ ذکر نشده است و لسی مقدار آن احتمالاً 915 kJ/mole است؛ آیا بیشتر از آن است؛ یا کمتر؟ انتخاب خود را شرح دهید.

۱۶. چرا نوترون می‌تواند حتی اگر اتمها با هم «تماس داشته باشند» از میان مواد عبور کند؟

۱۷. باریوم در پیوست (ب) نیامده است. براساس جدول تناوبی (شکل ۲-۱-۱) و سایر داده‌های پیوست (ب)، شعاع یون Ba^{2+} ؛ اتم Ba ؛ یون Ag^+ را پیش‌بینی کنید.

۱۸. چرا برای نسبت شعاعهای $\text{CN}=\text{C}$ حد پایینی وجود دارد ولی حد بالا وجود ندارد؟

۱۹. عواملی را که بر عدد کوئوردیناسیون ترکیبات یونی و ترکیبات کووالانسی اثر می‌گذارند ذکر کنید.

۲۵. مشخص کنید که مواد زیر جزء کدامیک از سه نوع ماده بخش ۲-۷ هستند: مفرغ، سیمان پرتلند، سیمان «لاستیک»، چوب، شیشه پنجره، باکلیت، زنگ فلز، اتیلن گلیکول (ضدیخ).

۲۱. موادی را که بین فلزات و سرامیکها؛ و بین پلی‌مرها و سرامیکها قرار می‌گیرند، ذکر کنید.

۲۲. فلزات مختلف، سرامیکهای مختلف و پلی‌مرهای مختلفی را که برای اجاق آشپزخانه به کار می‌روند، ذکر کنید.

۲۳. براساس داده‌های پاراگراف (۵) قسمت مرور و بررسی مطالب، α_L را برحسب T_m رسم کنید. با استفاده از داده‌های کتاب راهنما، فلزات دیگری را به این فهرست اضافه کنید. نتایج به دست آمده را شرح دهید.

۲۴. نقطه ذوب فلزات خالص (+۹۹٪) را که در پیوست (ج) ذکر شده است به دست

آورید. این مقادیر را بر حسب مدول کشسانی رسم کنید. الگوهای نتایج خود را شرح دهید.

۲۵. طلا و نیکل بین عناصر ذکر شده در پیوست (ب) وجود دارند و لسی در پیوست (ج) نیستند. ضریب انبساط گرمایی و مدول کشسانی هر یک را تخمین بزنید.
۲۶. گرافیت چندانست، یعنی خواص آن با جهت، تغییر بسیار می کند. شرح دهید که چرا رسانندگی گرافیت در جهت افقی (شکل ۲-۲-۶) صد برابر بیشتر از رسانندگی آن در جهت عمودی است.

مسائل

- ۱-۱-۲ الف) جرم اتم آلومینیم چقدر است؟ (ب) چگالی آلومینیم 2700 Mg/m^3 (ج) 2700 g/cm^3 است، در هر mm^3 چند اتم وجود دارد؟
- جواب: الف) $4.48 \times 10^{-23} \text{ g/atom}$ ؛ ب) $6.02 \times 10^{23} \text{ atoms/mm}^3$

- ۲-۱-۲ سیمی مسی 1312 g وزن، 215 mm قطر و 405 mm طول دارد. الف) در هر mm^3 چند اتم وجود دارد؟ (ب) چگالی آن را حساب کنید.

- ۳-۱-۲ لایمی حاوی 60 w/o قلع و 40 w/o سرب است. درصد اتمی هر عنصر چقدر است؟

جواب: 28 a/o Pb ؛ 72 a/o Sn

- ۴-۱-۲ الف) در هر گرم آهن چند اتم وجود دارد؟ (ب) حجم دانه‌ای از فلز که حاوی 10^{20} اتم آهن باشد چقدر است؟

- ۵-۱-۲ الف) با استفاده از داده‌های پیوستها، جرم اتم تنهای نقره را مشخص کنید. (ب) در هر mm^3 نقره چند اتم وجود دارد؟ (ج) بر اساس چگالی آن، حجم دانه نقره حاوی 10^{21} اتم چقدر است؟ (د) فرض کنید اتمهای نقره کروی اند ($R_{\text{Ag}} = 0.144 \text{ nm}$)، و از فضای بین آنها صرف نظر کنید. حجمی که 10^{21} اتم اشغال می کند چقدر است؟ (و) چند درصد حجمی از فضا اشغال می شود؟

- جواب: الف) $1.79 \times 10^{-22} \text{ g/Ag}$ ؛ ب) $5.86 \times 10^{23} \text{ Ag/mm}^3$ ؛ ج) 17 mm^3 ؛ د) 12.6 mm^3 ؛ ه) 74%

- ۶-۱-۲ مسئله ۵-۱-۲ را برای نیکل مجدداً حل کنید.

- ۷-۱-۲ الف) چگالی Al_2O_3 برابر با 38 Mg/m^3 (38 g/cm^3) است. در هر mm^3 چند اتم وجود دارد؟ (ب) در هر گرم چطور؟

جواب: الف) $1.12 \times 10^{23} \text{ atoms/mm}^3$ ؛ ب) $2.95 \times 10^{23} \text{ atoms/g}$

۸-۱-۲ حجم مکعبی از MgO که هر ضلع آن $nm\ ۴۲۰$ است حاوی ۴ یون Mg^{2+} و ۲ یون O^{2-} است. چگالی MgO چقدر است؟

۹-۱-۲ ترکیبی حاوی $۳۳a/o\ Cu$ و $۶۷a/o\ Al$ است. درصد وزنی هر کدام چقدر است؟

جواب: $۴۶\ w/o\ Al$ ؛ $۵۴\ w/o\ Cu$

۱۰-۱-۲ روی سطح برنجی ($۱۶۱۰\ mm^2$) پوشش نقره داده شده تا ضخامت آن به $۷۵\ \mu m$ رسیده است. الف) چه مقدار نقره (Ag^+) لازم است؟ ب) برای انجام این کار در مدت ۵ دقیقه چند آمپر لازم است؟

۱۱-۱-۲ سطح آبکاری شده‌ای از نقره استرلینگ ($۹۲۵\ w/o\ Ag$ ؛ $۷۵\ w/o\ Cu$) را می‌خواهیم روی ظرفی نقره‌ای پوشش دهیم. برای پوشش دادن ۱ میلی گرم در هر ثانیه چند آمپر لازم است؟ (Ag^+ و Cu^{2+})

جواب: $۱۰۵\ amp$

۱۲-۱-۲ ترتیب ارییتالها را برای اتم تنهای الف) کلر؛ ب) پتاسیم، مشخص کنید.
۱۳-۱-۲ ساختار الکترونی الف) اتمهای زیر کونیم؛ ب) یونهای Zr^{4+} را نشان دهید.

جواب: الف) $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^2\ 4p^6\ 4d^2\ 5s^2$

ب) $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^2\ 4p^6$

۱۴-۱-۲ تعداد الکترونهای $3d$ را در هر یک از یونهای زیر معین کنید.

الف) Ti^{2+} (ب) Ti^{4+} (ج) Cr^{2+} (د) Fe^{3+}

ه) Fe^{2+} (و) Mn^{2+} (ز) Mn^{4+} (ح) Ni^{2+}

ط) Co^{2+} (ی) Cu^+ (ک) Cu^{2+}

۱۵-۲-۲ برای شکستن پیوند کووالانسی بین کربن و نیتروژن تقریباً $10^{-19} \times 5$ ژول لازم است. برای تأمین این انرژی طول موج لازم برای فوتون چقدر است؟ (برای ثابتها پیوست الف را ببینید.)

جواب: $400\ nm$

۱۶-۲-۲ الکترونی تمام انرژی فوتون نور فرابنفش ($\lambda = 2768\ nm$) را جذب می‌کند. چند eV جذب می‌شود؟

۱۷-۳-۲ وزن مولکولی هریک از مولکولهای شکل ۱-۳-۲ را معین کنید.

جواب: الف) ۲۲ (ب) ۴۶ (ج) ۱۷ (د) ۷۸ (ه) ۹۲ (و) ۳۰ (ز) ۵۸ (ح) ۶۰ (ط) ۲۸ (ی) ۶۲۵

□ ۲-۳-۲ ترکیبی آلی حاوی ۶۲٫۱ w/o کربن ، ۱۰٫۳ w/o هیدروژن ، و ۲۷٫۶ w/o اکسیژن است. یک ترکیب ممکن را نام ببرید.

□ ۳-۳-۲ به شکل ۳-۳-۲ رجوع کنید. متیل یدید (CH_3I) ساختاری مشابه دارد؛ ولی زاویه $\text{H}-\text{C}-\text{H}$ برابر با 111.9° است. زاویه $\text{H}-\text{C}-\text{I}$ در CH_3I چقدر است؟ (این مسئله هندسه است؛ ولی اعوجاج را در مولکول قطبی نشان خواهد داد.)

جواب: 107.5°

□ ۴-۳-۲ سه ایزومر از چهار ایزومر ممکن بوتانل ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) را رسم کنید.

□ ۵-۳-۲ ساختار ایزومرهای مختلف اکتان C_8H_{18} را رسم کنید.

□ ۱-۴-۲ اگر دوقطبی الکتریکی مولکول C_6H_6 $3.1 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ و زاویه پیوند $\text{H}-\text{S}-\text{H}$ 93° باشد، گشتاور دوقطبی الکتریکی هر یک از بازوهای $\text{H}-\text{S}$ ترکیب H_2S را حساب کنید.

جواب: $3.1 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$

□ ۲-۴-۲ فاصله $\text{H}-\text{F}$ در HF ، 91 nm است و در مجموع 1.05 الکترون موجود است. گشتاور دوقطبی الکتریکی مولکول HF برابر $3.8 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ است. الف) مرکز بار منفی تا مرکز بار مثبت (نقطه مبدأ) چقدر فاصله دارد؟ ب) این فاصله چه کسری از کل طول پیوند است؟

□ ۳-۴-۲ مولکول HCl را به صورت H^+Cl^- در نظر بگیرید. اگر گشتاور دوقطبی $3.8 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ باشد مراکز دویون چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟

جواب: 91 nm

□ ۱-۵-۲ با مراجعه به مثال ۱-۵-۲ و توضیحات آن، نیروهای جاذبه و دافعه بین یونهای Mg^{2+} و O^{2-} (الف) در $a = 0.2 \text{ nm}$ و؛ ب) در $a = 0.22 \text{ nm}$ حساب کنید.

جواب: الف) 2.3 nJ/m ، -35 nJ/m ؛ ب) 1.9 nJ/m ، -1.3 nJ/m

□ ۲-۵-۲ نیروی خالص ($F_C + F_R$) را برای $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ بر حسب فاصله بین اتمی از 91 nm تا 23 nm یعنی $0.2 \text{ nm} \pm a_{\text{Mg-O}}$ رسم کنید. (داده‌های لازم را از مثال ۱-۵-۲ و مسئله ۱-۵-۲ به دست آورید.)

□ ۳-۵-۲ در مسئله ۲-۵-۲، رسم منحنی را تا تعیین بیشینه نیروی خالص بین یونهای

Mg^{2+} و O^{2-} ادامه دهید. فاصله حاصل از نیروی بیشینه چقدر است؟

جواب: در 0.24 nm ، 1.03 nJ/m ، در 0.25 nm ، 1.10 nJ/m ؛ در 0.26 nm ، 1.108 nJ/m ؛ در 0.27 nm ، 1.09 nJ/m (با قراردادن $d(F_C + F_R)/da = 0$)
بیشینه در 0.258 nm است و $[(F_C + F_R) = 1.11 \text{ nJ/m}]$.

□ ۲-۵-۴ طبق محاسبات مثال ۲-۵-۲، انرژی پیوند $Mg^{2+} \rightarrow O^{2-}$ را در چندین نقطه برگزیده بین 0.19 و 0.23 nm یعنی $0.20 \pm a_{Mg-O}$ حساب کنید.

□ ۲-۵-۵ با استفاده از رابطه (۲-۵-۵) منحنی انرژی را بر حسب فاصله جداکننده، برای Na^+ و Cl^- از 0.22 تا 0.32 nm یعنی $0.27 \pm a_{Na-Cl}$ رسم کنید.
(از مثال ۲-۵-۱، b برای $NaCl = 1.05 \times 10^{-10} \text{ Jm}^3$.)

جواب: در 0.24 nm ، $-0.58 \times 10^{-18} \text{ J}$

در 0.26 nm ، $-0.70 \times 10^{-18} \text{ J}$

در 0.28 nm ، $-0.73 \times 10^{-18} \text{ J}$

در 0.30 nm ، $-0.72 \times 10^{-18} \text{ J}$

در 0.32 nm ، $-0.69 \times 10^{-18} \text{ J}$

در 0.22 nm ، $-0.21 \times 10^{-18} \text{ J}$

در 0.40 nm ، $-0.57 \times 10^{-18} \text{ J}$

(دانهایی: اگر صورت و مخرج کسر به 10^{-90} تقسیم شود می توان محاسبه را با ماشین حساب انجام داد.)

۲-۵-۶ براساس داده های جدول ۲-۵-۱ حجمهای کروی Fe^{2+} و Fe^{3+} را مقایسه کنید.

۲-۵-۷ حجم اتمهای آهن را هنگامی که ۸ و ۱۲ همسایه دارند براساس شعاعهای آنها (جدول ۲-۵-۱) مقایسه کنید.

جواب:

(در صورت کروی بودن) $V_{CN=8} = 0.008 \text{ nm}^3$ ، $V_{CN=12} \sim 0.0086 \text{ nm}^3$

۲-۵-۸ شعاعهای یونی ذکر شده در پیوست (ب) وقتی به کار می رود که شش همسایه وجود داشته باشد ($CN=6$)، الف) شعاع یونهای هالوژنها، وقتی هشت همسایه داشته باشند، چقدر است؟ ب) شعاع Zn^{2+} ، وقتی تنها چهار همسایه داشته باشد چقدر است؟

۲-۶-۱ مبدأ 0.73 را در جدول ۲-۶-۱ نشان دهید.

جواب: $2(r+R) = \sqrt{3}(2R)$

۶-۶-۲ الف) شعاع کوچکترین کاتیونی که می‌تواند بایونهای O^{2-} ، بدون اعوجاج، عدد کوئوردیناسیون ۶ داشته باشد، چقدر است؟ ب) عدد کوئوردیناسیون ۸ چگونه؟

۶-۶-۲ مبدأ ۲۲ره را در جدول ۶-۶-۱ نشان دهید. (توجه داشته باشید که چهاریون یزرگ شکل ۶-۶-۱ ب) را در چهار گوشه مکعب و یون کوچک را در مرکز مکعب قرار دهید. (شکل ۶-۶-۳ الف) را ببینید.)

جواب: $2(r+R)/\sqrt{3} = 2R/\sqrt{2}$

۶-۶-۴ به شکل ۶-۶-۳ نگاه کنید. الف) عدد کوئوردیناسیون هر یک از یونهای Na^+ چقدر است؟ ب) برای هر یون Cl^- چگونه؟ (فرض کنید ساختار باهمین الگو در اطراف شکل موجود ادامه یابد.)

۶-۶-۵ شش یون O^{2-} در اطراف یون Mg^{2+} قرار می‌گیرند. یونها را گلوله‌های سختی با شعاع ذکر شده در جدول ۶-۶-۱ در نظر بگیرید. فاصله بین سطوح یونهای O^{2-} چقدر است؟

جواب: $nm \ 0.51 =$ شکاف

۶-۶-۶ شش یون Cl^- در اطراف یون Na^+ قرار می‌گیرند. فاصله بین سطوح کره‌های Cl^- بر اساس داده‌های جدول ۶-۶-۱ چقدر است؟

۶-۶-۷ الف) از پیوست (ب) سه کاتیون دوظرفیتی را ذکر کنید که عدد کوئوردیناسیون آنها با S^{2-} ، ۶ است و نه ۸. ب) دویون دوظرفیتی را که می‌توانند با F^- عدد کوئوردیناسیون ۸ به وجود آورند ذکر کنید.

جواب: ب) Pb, Hg, Ca

نظم اتمی در جامدات

چشم انداز فصل

پس از بررسی پیوندهای اتم-به-اتم، قدم بعدی در بررسی ساختار داخلی مواد، مطالعه الگوهای نظم پر دامنه اتمهاست. این مطلب در مورد جامدات بلوری نسبتاً آسان است زیرا سلولهای واحدی در آنها تشکیل می شوند که در جهات سه گانه مرتباً تکرار می شوند. هر سلول واحد تمام ویژگیهای هندسی بلور کامل را دارد. هدف این فصل، مشاهده و بررسی آرایش اتمی در چند ساختار ساده تر (hcp ، fcc ، bcc) و اعتبار بخشیدن به حضور این ساختارها در محاسبات چگالی است.

خواننده باید با نمادهای مکانهای سلول واحد، جهات بلوری، و صفحات بلوری آشنا شود زیرا این مطالب در فصلهای بعد برای ربط دادن ساختار بلوری مواد به خواص و رفتار آنها مرتباً به کار خواهد رفت.

هدف از مطالعه

۱. تعمیم مفهوم سلول واحد به طوری که بتوان از سلول واحد برای تجسم الف) آرایش اتمی موجود، ب) نظم پدیده موجود در جهات و صفحات مختلف و ج) چگالیهای فشردگی در ۱، ۲، و ۳ بعد استفاده کرد.

۲. تعریف الگوهای نظم (به نام شبکه) که در بعضی فلزات ساده تر با آنها برخورد می کنیم، به ویژه bcc و fcc، و همچنین سایر الگوها مثل hcp و bct.

۳. توانایی الف) محاسبه و ارتباط دادن شعاع اتمی فلزات به (۱) اندازه سلول واحد، (۲) ضرایب فشردگی اتمی و (۳) چگالی و ب) اصلاح کردن محاسبات مربوط به ترکیبات ساده ای مانند NaCl.

۴. تجسم جهات و صفحات بلوری از شاخصهای آنها، به طوری که بعداً بتوانیم خواص چندسویی را تعریف کنیم بی آنکه هر بار روابط هندسی مربوط به آن را شرح دهیم.

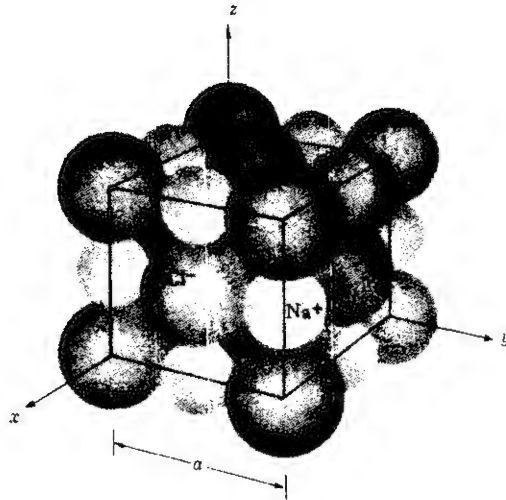
۵. اطلاع از اینکه بسیاری از جامدات می توانند ساختار بلوری خود را با تغییر دما و یا فشار تغییر دهند؛ و اینکه این تغییرات مستلزم شکستن پیوندها، حرکت اتمها و تشکیل پیوندهای جدید است که همه نیاز به زمان دارند.

□ ۶. مرور فیزیک مربوط به حرکات موجی به طوری که بتوان اساسی تفرق اشعه ایکس را، که روشی بسیار دقیق است دریافت، این روش می تواند برای به دست آوردن فاصله بین صفحات، شعاع اتمی و ... به کار رود.

۳-۱ بلورینگی

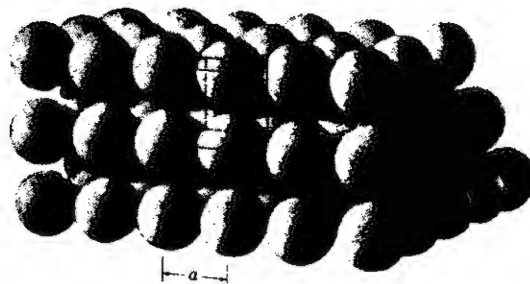
اساساً کلیه فلزات، بخش عظیمی از سرامیکها و بعضی از انواع پلی مرها در موقع انجماد به صورت بلور درمی آیند. یعنی بر اثر این عمل اتمها به صورت منظم، سه بعدی و تکرار شونده ای آرایش می یابند. چنین ساختاری را بلود می نامند (شکل ۱-۳-۱).

این نظم پدیده که چندین فاصله اتمی امتداد دارد ناشی از کوئوردیناسیون اتمی (بخش ۲-۶) در داخل ساده است. به علاوه این شبکه گساهی شکل خارجی بلور را نیز تعیین می کند؛ شکل شش بر ذرات برف شاید آشنا ترین مثال در این مورد باشد. سطح مسطح بلورهای کوارتز (SiO_2) و حتی نمک طعام معمولی (NaCl) نظم داخلی بلورین آنها را نشان می دهد. در تمام حالات حتی اگر سطوح خارجی تغییر کنند، آرایش داخلی اتمها پایدار می ماند. مثلاً اگر سطوح بلورهای کوارتز برای تولید شن سیلیکاتی مدور ساییده شود ساختار بلور کوارتز تغییر نمی کند. به همین ترتیب آرایش شش بر مولکولهای آب در تکه های یخ نیز مانند ذرات برف است.



شکل ۱-۱-۳ ساختار بلوری. وجوه مکعبی نمک طعام همان وجوه بلوری ساختار NaCl است. MgO نیز ساختار مشابهی دارد.

سلولهای واحد. در شکل ۱-۱-۳، نظم پُر دامنه که از مشخصات بلور است، دیده می‌شود. این مدل یکی از چند الگو یا شبکه‌ای است که در صورت وجود تنها یک نوع اتم ممکن است به وجود آیند. از آنجا که الگوی اتمی به‌طور نامحدودی تکرار می‌شود، بهتر است شبکه بلوری را به سلولهای واحد تقسیم کرد. سلولهای واحد حجمهای کوچکی‌اند که هر کدام تمام مشخصات موجود در کل بلور را دارند.



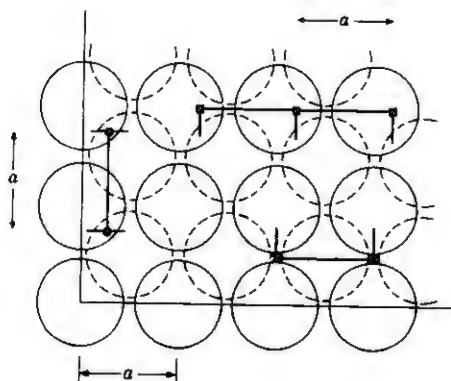
شکل ۱-۱-۳ سلول واحد. حجم کوچک تکرار شونده در داخل بلور، سلول واحد نامیده می‌شود. اگر بلور مکعبی باشد، ثابت شبکه a در سه جهت مختصات یکسان است.

در الگوی نظم پُر دامنه بلور، فاصله تکرار به نام ثابت شبکه، اندازه سلول واحد را مشخص می‌کند. بنا بر این، a ، بعد تکرار شونده شکل ۱-۲، اندازه ضلع سلول واحد نیز هست. از آنجا که الگوی بلوری شکل ۱-۲ مشابه با جهات مختصات قائم است این سلول واحد مکعبی است و a ثابت شبکه در هر سه بعد است. در بلورهای غیر مکعبی ثابت شبکه در سه جهت مختصات با یکدیگر تفاوت دارد.

گوشه سلول واحد می‌تواند در هر جای بلور قرار گیرد. بنا بر این گوشه می‌تواند در مرکز اتم، هر جایی درون اتم، یا هر نقطه‌ای بین اتمها، مثلاً نقطه \square شکل ۱-۳، قرار گیرد. هر جا که واقع شود، حجم کوچک توسط حجم مشابهی در کنار آن دو برابر می‌شود (به شرط آنکه سلول همان جهتگیری الگوی بلوری را داشته باشد) هر یک از سلولها تمام صور هندسی کل بلور را دارند.

سیستمهای بلوری. بلورهای مکعبی در هر سه جهت عمود بر هم الگوهای مشابهی دارند: $a_1 = a_2 = a_3$. قسمت اعظم فلزات و بخش عمده‌ای از مواد سرامیکی مکعبی‌اند (بلورهای مولکولی به ندرت مکعبی‌اند).

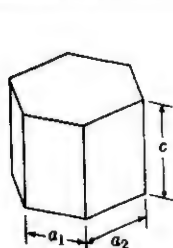
بلورهای غیر مکعبی وقتی به وجود می‌آیند که الگوی تکرار شونده در سه جهت مختصات یکی نباشد، یا زاویه بین سه محور بلور 90° نباشد. هفت سیستم بلوری مختلف وجود دارد. این سیستمها در جدول ۱-۱ به همراه ویژگیهای هندسی آنها ذکر شده است. در این کتاب بیشتر روی بلورهای ساده‌تر و مکعبی قرینه تأکید شده است. ولی باید بایستیم شش بر نیز آشنا شویم علاوه بر این، به بلورهای راست وجهی و مکعب مستطیل نیز که دارای واحد بلوری با مشخصاتی طبق شکل ۱-۴ است، بر می‌خوریم.



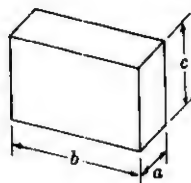
شکل ۱-۳ ثابت شبکه. فاصله تکرار شونده بین نقاط مشابه در بلور به موازات محور بلور است. سلول واحد معمولاً، نه الزاماً، با اتمهایی که در گوشه قرار می‌گیرند نشان داده می‌شود.

جدول ۱-۱-۳ سیستمهای بلوری

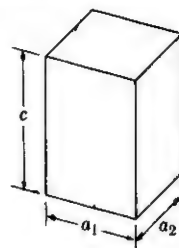
سیستم	محورها	زوایای بین محورها
مکعبی	$a_1 = a_2 = a_3$	کلیه زوایا $= 90^\circ$
راست وجهی	$a_1 = a_2 \neq c$	کلیه زوایا $= 90^\circ$
مکعب مستطیل	$a \neq b \neq c$	کلیه زوایا $= 90^\circ$
کج وجهی	$a \neq b \neq c$	دو زاویه $= 90^\circ$ ، بیک زاویه $\neq 90^\circ$
متوازی السطوح	$a \neq b \neq c$	زوایای نامساوی و مخالف 90°
منشور شش بر	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	زوایا $= 90^\circ$ و 120°
لوزوجهی	$a_1 = a_2 = a_3$	کلیه زوایا مساوی ولی مخالف 90°



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱-۳-۴ بلورهای غیر مکعبی. (الف) راست وجهی، $a_1 = a_2 \neq c$ ، (ب) مکعب مستطیل، $a \neq b \neq c$ ، زوایا $= 90^\circ$ ، (ج) منشور شش بر، $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ ، زوایا $= 90^\circ$ و 120° .

مثال ۱-۱-۳ سلول واحد کرم مکعبی است و دو اتم دارد. با استفاده از داده‌های پیوست (ب) ثابت شبکه کرم را معین کنید.

حل: چگالی کرم 7.20 Mg/m^3 است.

$$\text{جرم هر سلول واحد} = \frac{2 \text{ Cr}(52.00 \text{ g})}{0.602 \times 10^{24} \text{ Cr}}$$

$$= 1.72776 \times 10^{-22} \text{ g.}$$

$$\text{حجم} = a^3 = \frac{1.72776 \times 10^{-22} \text{ g}}{7.20 \times 10^6 \text{ g/m}^3}$$

$$= 23994 \times 10^{-30} \text{ m}^3$$

$$a = 0.2884 \times 10^{-9} \text{ m} \quad (\text{یا } 0.2884 \text{ nm})$$

توضیح. همین مقدار از آزمایش تفرق اشعه ایکس به دست آمده است (بخش ۳-۸).

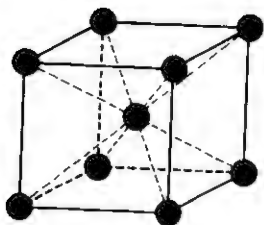
۲-۳ شبکه‌های مکعبی

بلورهای مکعبی یکی از سه شبکه زیر را دارند: مکعب ساده، مکعب مرکزدار، و مکعب با وجوه مرکزدار. شبکه، الگوی تکرار شونده سه بعدی است که در بلور گسترش می‌یابد. بخش عمده‌ای از فلزات، دارای شبکه مکعبی مرکزدار (bcc) یا شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار (fcc) هستند.

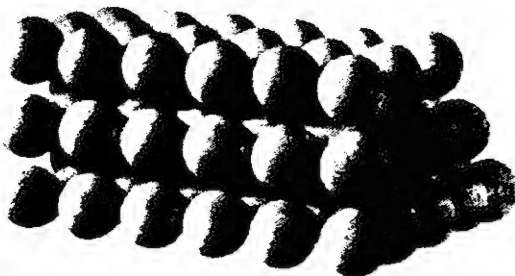
فلزات مکعبی مرکزدار، آهن ساختار مکعبی دارد. سلول واحد آهن در دمای اتاق در هر گوشه مکعب یک اتم و در مرکز مکعب، اتم دیگری دارد (شکل ۱-۲-۳). آهن معروفترین فلزی است که ساختار مکعبی مرکزدار دارد ولی تنها فلزی نیست که دارای این ساختار است. بین سایر فلزاتی که در پیوست (ب) آمده‌اند، کرم و تنگستن نیز آرایش مکعبی مرکزدار دارند. در این ساختار مکعبی مرکزدار (bcc)، هر اتم آهن چه در گوشه و چه در مرکز سلول واحد قرار گیرد به وسیله هشت اتم آهن مجاور احاطه می‌شود. بنا بر این هر اتم دارای محیط هندسی کاملاً مشابهی است [شکل ۱-۲-۳ (الف)]. در ساختار bcc، در هر سلول واحد ۲ اتم وجود دارد. یک اتم در مرکز مکعب و در هشت گوشه آن هشت تا یک هشتم اتم قرار می‌گیرد (شکل ۲-۲-۳). در فلز، ثابت شبکه‌ای این ساختار، a ، طبق رابطه زیر به شعاع اتمی، R ، مربوط می‌شود

$$(a_{\text{bcc}})_{\text{فلز}} = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (1-2-3)$$

می‌توانیم ضریب فشردگی اتمی (PF) را در مورد فلز bcc به کار ببریم. فرض بر این

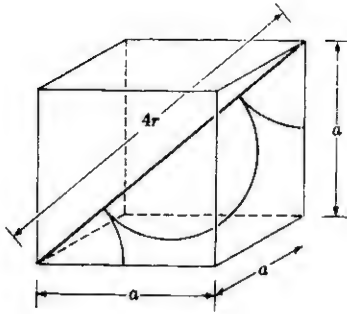


(ب)



(الف)

شکل ۱-۲-۳ ساختار مکعبی مرکزدار فلز. (الف) نمای طرح‌وار نشانه‌دهنده مکان مراکز اتم‌هاست؛ (ب) مدل ساخته شده از گلوله‌های سخت.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۲-۲ سلول واحد مکعبی مرکزدار (فلز). ساختار فلز bcc در هر سلول واحد دو اتم دارد و ضریب فشردگی اتمی آن برابر ۰٫۶۸ است، طبق رابطه (۳-۲-۱)، ثابت شبکه ای α به شعاع اتمی مربوط می شود.

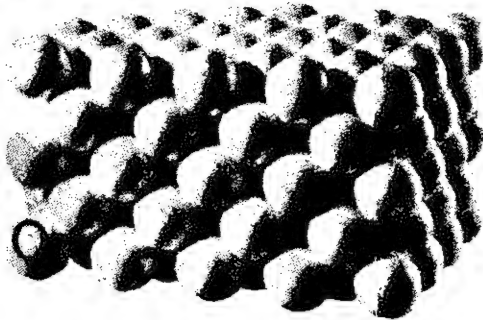
است که اتمها کروی اند (مدل گلوله های سخت). ضریب فشردگی کسری از حجم سلول واحد است که توسط این اتمهای کروی اشغال می شود

$$(۳-۲-۲) \quad \text{ضریب فشردگی} = \frac{\text{حجم اتمها}}{\text{حجم سلول واحد}}$$

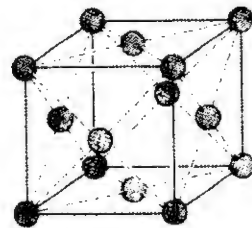
از آنجا که در هر سلول واحد فلز bcc دو اتم وجود دارد،

$$\begin{aligned} PF &= \frac{2[4\pi R^3/3]}{a^3} \\ &= \frac{2[4\pi R^3/3]}{[4R/\sqrt{3}]^3} = 0.68 \end{aligned}$$

فلزات مکعبی با وجوه مرکزدار (fcc). گرچه مس ساختار مکعبی دارد ولی آرایش اتمی این



(ب)



(الف)

شکل ۳-۲-۳ ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار (فلز). (الف) طرحواره مکان مراکز اتمی را نشان می دهد؛ (ب) مدلی که از گلوله های سخت ساخته شده است.

عنصر مانند آهن نیست. علاوه بر اتمهای موجود در هر گوشه سلول واحد مس، یک اتم نیز در مرکز هر وجه قرار دارد ولی هیچ اتمی در مرکز مکعب قرار نمی گیرد. (شکل ۳-۲-۳). ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار (fcc) در بین فلزات تاحدودی متداولتر از ساختار bcc است. آلومینیم، مس، سرب، نقره، ونیکل همچنین آهن در دماهای بالا دارای این آرایش اتمی اند.

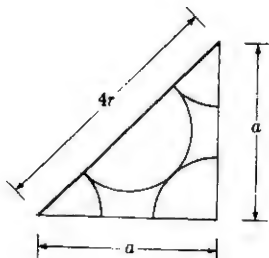
هر فلزی که ساختار fcc داشته باشد، تعداد اتمهای آن چهار برابر تعداد سلولهای واحد آن است. یک هشتم اتم در هر کدام از هشت گوشه جمعاً یک اتم می شود و شش اتم در مرکز وجوه جمعاً سه اتم در هر سلول واحد فراهم می آورد (شکل ۳-۲-۴). در فلز، رابطه ثابت شبکه ای، a ، با شعاع اتمی، R ، به صورت زیر است

$$(a_{fcc})_{\text{فلز}} = 4R/\sqrt{2} \quad (3-2-3)$$

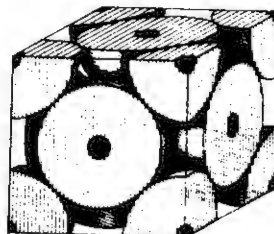
طبق مثال ۳-۲-۱، ضریب فشردگی فلز fcc ۷۴٪ است که از ضریب فشردگی فلز bcc یعنی ۶۸٪، بیشتر است. از آنجا که در ساختار bcc، هر اتم فقط هشت همسایه دارد انتظار چنین اختلافی می رود. در فلز fcc هر اتم ۱۲ همسایه دارد. این مطلب در شکل ۳-۲-۳ شرح داده شده و دیده می شود که اتم موجود در مرکز وجه روبرویی چهار همسایه مجاور، چهار همسایه که در قسمت پشت در تماس اند و چهار همسایه مشابه در جلو دارد.

ترکیبات fcc. طبق شکل ۳-۱-۱ برای NaCl، ترکیبات نیز می توانند شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار داشته باشند. مرکز هر وجه از هر جنبه ای مشابه با گوشه هاست. در ترکیب NaCl که در آن اتمهای غیر مشابه با یکدیگر تماس دارند، ابعاد سلول واحد fcc از مجموع دوشعاع به دست می آید

$$(a_{fcc})_{\text{NaCl}} = 2(r_{\text{Na}^+} + R_{\text{Cl}^-}) \quad (4-2-3)$$



(ب)



(الف)

شکل ۳-۲-۴ سلول واحد مکعب با وجوه مرکزدار (فلز). ساختار فلز fcc در هر سلول واحد چهار اتم دارد و ضریب فشردگی اتمی آن برابر ۷۴٪ است، ثابت شبکه ای فلزات، a ، طبق رابطه (۳-۲-۳) به شعاع اتمی مربوط می شود.

از روابط (۳-۲-۳)، (۳-۲-۳) یا (۴-۲-۳) می‌توان حجم سلول واحد را معین کرد. همچنین تعداد اتمها در سلول واحد، محاسبه جرم آن را ممکن می‌سازد. این دو توأماً امکان محاسبه چگالی را به ما می‌دهند (مثال ۲-۲-۳) از این راه جوابهای بسیار دقیقی به دست می‌آید.

مثال ۳-۲-۱ الف) ضریب فشردگی اتمی فلز fcc (شکل ۴-۲-۳) را محاسبه کنید.
ب) ضریب فشردگی یونی NaCl را که fcc است حساب کنید (شکل ۳-۱-۱).

حل: الف) از روابط (۲-۲-۳) و (۳-۲-۳) داریم

$$PF = \frac{4(\pi R^3/3)}{a^3} = \frac{16\pi R^3(2/\sqrt{2})}{(3)(64R^3)} = 0.74$$

ب) با استفاده از روابط (۲-۲-۳) و (۴-۲-۳)، شکل ۳-۱-۱ و شعاعهای مندرج در پیوست (ب) داریم

$$PF = \frac{4(\pi r^3/3) + 4(\pi R^3/3)}{(2r+2R)^3} = \frac{16\pi(0.097^3 + 0.181^3)}{3(8)(0.097 + 0.181)^3} = 0.67$$

توضیح. از این مثال معلوم می‌شود در صورتی که فقط يك اندازه اتمی وجود داشته باشد ضریب فشردگی اتمی به اندازه اتم بستگی ندارد. برعکس اگر بیش از يك نوع اتم وجود داشته باشد، اندازه نسبی اتمها بر ضریب فشردگی اثر می‌گذارد. ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار دارای بالاترین ضریب فشردگی اتمی (۰.۷۴) ممکن برای يك فلز خالص است. بنابراین، این ساختار را می‌توان ساختار مکعبی فشرده (ccp) نامیده همان‌طور که انتظار می‌رود بسیاری از فلزات چنین ساختاری دارند، گرچه بعداً خواهیم دید که در ساختار منشور شش بر فشرده نیز ضریب فشردگی اتمی برابر ۰.۷۴ است. ▲

مثال ۳-۲-۲ مس ساختار fcc دارد و شعاع اتمی آن ۰.۱۲۷۸ nm است. چگالی آن را حساب کنید و مقدار آن را با چگالی موجود در پیوست (ب) مقایسه کنید.

حل: از معادله (۳-۲-۳)

$$a = \frac{4}{\sqrt{2}}(0.1278 \text{ nm}) = 0.3615 \text{ nm}$$

از شکل ۴-۲-۳

$$\frac{\text{اتم}}{\text{سلول واحد}} = \frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 4$$

$$\text{چگالی} = \frac{\text{سلول واحد / جرم}}{\text{سلول واحد / حجم}} \quad (3-2-5, \text{الف})$$

$$= \frac{(\text{اتم / گرم})(\text{سلول واحد / اتم})}{3 (\text{ثابت شبکه})} \quad (3-2-5, \text{ب})$$

$$\text{چگالی} = \frac{4[63.5 / (0.602 \times 10^{24})]}{(0.3615 \times 10^{-9} \text{ m})^3} = 892 \text{ Mg/m}^3 (= 892 \text{ g/cm}^3)$$

▲ مقدار تجربی آن در پیوست (ب) 892 Mg/m^3 است.

مثال 3-2-3 حجم سلول واحد LiF را، که همان ساختار NaCl را دارد، حساب کنید (شکل 3-1-1).

حل: با وجود آنکه LiF، fcc است نمی‌توانیم از شکل هندسی شکل 3-2-3 (ب) استفاده کنیم، زیرا یونهای فلوئور برخلاف اتمهای فلزی یا یکدیگر تماس ندارند. در عوض a دو برابر مجموع r_{Li} و r_{F} است. (یک بار دیگر شکل 3-1-1 را ببینید.) از پیوست (ب)

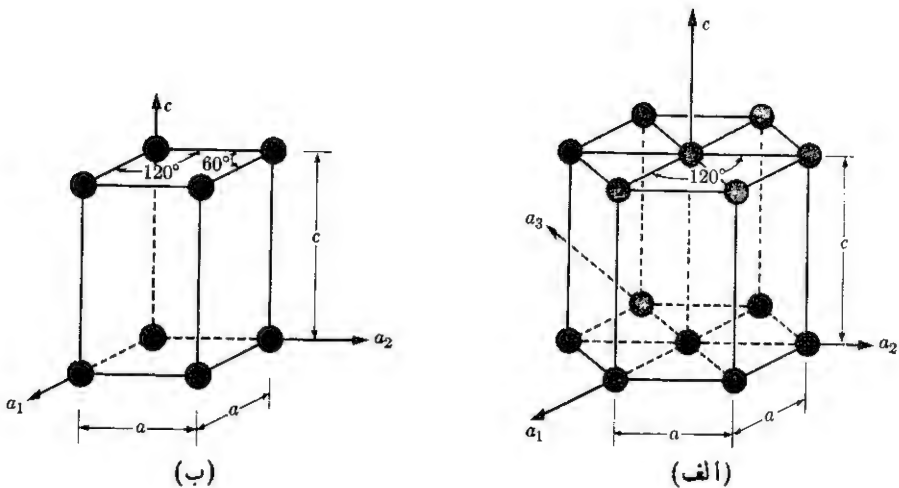
$$a = 2(0.068 + 0.133) \text{ nm}$$

$$a^3 = 0.065 \text{ nm}^3 \quad (یا \quad 65 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$$

توضیح. از شعاع یونی استفاده می‌کنیم زیرا LiF ترکیبی یونی است. علاوه بر این هریون شش همسایه دارد. بنابراین شعاع موجود در پیوست (ب) را نباید اصلاح کرد. ▲

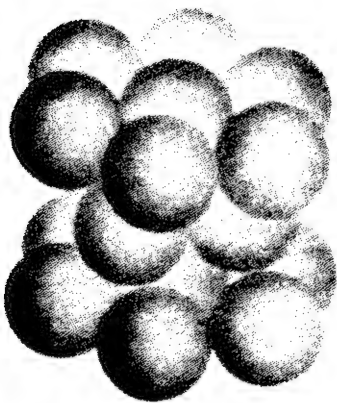
3-3 بلورهای منشور شش بر

شبکه شکلهای 3-3-1 (الف) و 3-3-1 (ب) دو نمونه از سلولهای واحد منشور شش بر است. زوایا در قاعده 120° (و 60°) هستند. در داخل این سلولها هیچ مکانی معادل مکانهای گوشه‌ای نیست. اگرچه حجم سلول شکل 3-3-1 (الف) سه برابر حجم سلول شکل 3-3-1 (ب) است ولی تعداد اتمهای موجود در آن نیز سه برابر شکل دوم است (3 در مقابل 1) و بنابراین تعداد اتمها در واحد حجم یکسان می‌ماند. فلزات با آرایش اتمی مطابق با شکل 3-3-1 بلوری نمی‌شوند زیرا ضریب فشردگی آن بسیار کم است.

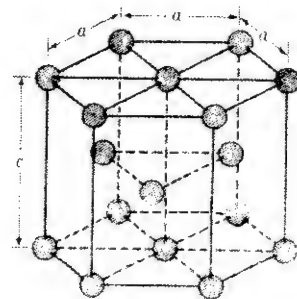


شکل ۳-۳-۱ سلول واحد منشور شش بر سازه. (الف) نمایش منشور شش بر؛ ب، نمایش راست وجهی؛ دو شکل فوق معادل اند، $a \neq c$ و زاویه در صفحه قاعده برابر 120° و زاویه عمودی برابر 90° است.

منشور شش بر فشرده. منبزم ساختار منشور شش بر خاصی طبق شکل ۳-۳-۲ تشکیل می دهد. چنین ساختاری که فشرده تر از ساختار شکل ۳-۳-۱ است منشور شش بر فشرده (hcp) نامیده می شود. مشخصه این ساختار آن است که اتمهای هر لایه مستقیماً بالای



(ب)



(الف)

شکل ۳-۳-۲ ساختار منشور شش بر فشرده (الف) تصویر طرحواری که مکان مراکز اتمها را نشان می دهد؛ (ب) مدل ساخته شده با گلوله های سخت.

یا زیر جاهای خالی بین سه اتم لایه‌های مجاور، قرار می‌گیرند. در نتیجه هر اتم در لایه زیر صفحه خود با سه اتم، در صفحه خود با شش اتم و در لایه بالایی با سه اتم در تماس است، بنابراین $۱۲ = CN$. در ساختار hcp شکل ۳-۳-۲ به طور متوسط شش اتم در هر سلول واحد وجود دارد. (یا اگر از شکل راست وجهی استفاده شود در هر سلول واحد ۲ اتم موجود است).

ضریب فشردگی اتمی فلز hcp را می‌توان محاسبه کرد و عددی برابر ۰٫۷۴ به دست آورد. این عدد مشابه با ضریب فشردگی اتمی فلزات fcc است که قابل پیش‌بینی است زیرا هر دو دارای عدد کوئوردیناسیون ۱۲ هستند.

مثال ۳-۳-۱ ضریب فشردگی اتمی منیزیم، مانند تمام فلزات hcp، ۰٫۷۴ است. حجم سلول واحد آنکه در شکل ۳-۳-۲ (الف) دیده می‌شود چقدر است؟

حل: در پیوست (ب)، برای منیزیم $\rho = ۱۷۲۴ \text{ Mg/m}^3$ (یا ۱۷۲۴ g/cm^3)، و جرم اتمی آن ۲۴۳۱ amu است. از شکل ۳-۳-۲ (الف)، $۱۲/۶ + ۲/۲ + ۳ = ۶$ ، (الف) از شکل ۳-۳-۲ (الف)، اتم در هر سلول واحد وجود دارد.

$$\text{اتم} \times ۱۰^{۲۸} \times ۲۳۱ = \frac{(۱۷۲۴ \times ۱۰^۶ \text{ g/m}^3)}{۲۴۳۱ \text{ g}/۰٫۰۶۰۲ \times ۱۰^{۲۴} \text{ اتم}} \times ۱ \text{ m}^۳ \text{ مینا}$$

$$\begin{aligned} \text{حجم سلول واحد} &= \frac{۶}{۲۳۱ \times ۱۰^{۲۸} \text{ اتم/m}^۳} \\ &= ۱۷۴ \times ۱۰^{-۲۸} \text{ m}^۳ = ۰٫۱۷۴ \text{ nm}^۳ \end{aligned}$$

حل دیگر: پیوست (ب)، $R_{\text{Mg}} = ۰٫۱۶۱ \text{ nm}$.

$$\text{اتم} \times ۶ \left(\frac{۴\pi}{۳} \right) \frac{(۰٫۱۶۱ \text{ nm})^۳}{۰٫۷۴} = ۰٫۱۷۴ \text{ nm}^۳$$

توضیح. شعاع متوسط اتم منیزیم $۰٫۱۶۱ \text{ nm}$ است. ولی داده‌های تفرق اشعه ایکس نشان می‌دهند که اتمهای Mg تقریباً ۱ درصد فشرده می‌شوند و به صورت کره‌های پهن شده درمی‌آیند. (به توضیحات مثال ۳-۳-۲ توجه کنید). ▲

□ **مثال ۳-۳-۲** با فرض کروی بودن اتمها، نسبت c/a يك فلز hcp چقدر است؟

حل: با توجه به شکل ۳-۳-۲ (الف) و در نظر گرفتن سه اتم مرکزی همراه با يك اتم در مرکز قاعده بالایی، این شکل چهاروجهی، با اضلاع مساوی، $a = ۲R$ ، است. با استفاده از روابط هندسی داریم

$$h = a \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$c = 2h = 2a \sqrt{\frac{2}{3}} = 1.63a \quad (1-3-3)$$

توضیح. نسبت c/a فلزات hcp نا حدودی بسا این عدد تفاوت دارد: برای Mg، ۱.۶۲؛ برای Ti، ۱.۵۹؛ و برای Zn، ۱.۸۵ است. این بدان معنی است که باید اتمهای منیزیم و تیتانیم را به صورت کره‌های کمی فشرده شده و اتمهای روی را به صورت کره‌های دوکی شکل در نظر بگیریم. ▲

□ مثال ۳-۳-۳ حجم سلول واحد تیتانیم hcp در 20° ، طبق شکل ۲-۳-۳ (الف) برابر $nm^3 106$ است. نسبت c/a برابر ۱.۵۹ است. مقادیر c و a چقدر است؟ (ب) شعاع Ti در جهتی که روی قاعده سلول واحد قرار دارد چقدر است؟

حل:

(الف) با استفاده از روابط هندسی داریم

$$\text{سطح قاعده} = 6 \left(\frac{1}{2} \right) (a)(a \sin 60^\circ) = 2.60a^2$$

$$\text{حجم} = (1.59a)(2.60a^2) = 4.13a^3 = 0.106 \text{ nm}^3$$

$$a = 0.295 \text{ nm} \quad \text{و} \quad a^3 = 0.02566 \text{ nm}^3$$

$$c = 1.59(0.295 \text{ nm}) = 0.469 \text{ nm}$$

$$a = 2R_{\text{قاعده}} ; \therefore R = 0.1475 \text{ nm} \quad (\text{ب})$$

توضیح. شعاع متوسط 0.146 nm است (پیوست ب). اتمهای تیتانیم (و سلول واحد آن) اندکی در جهت c فشرده شده است (به توضیحات مثال ۲-۳-۳ توجه کنید). ▲

۲-۳ چندشکلی

در بخش ۳-۲ گفتیم که حتی مولکولهایی که ترکیب شیمیایی مشابهی دارند می‌توانند ساختارهای متفاوتی داشته باشند این مولکولها را ایزومر می‌نامند. وضعیت مشابهی که برای ما بسیار با اهمیت است در جامدهای بلوری رخ می‌دهد. چندشکلیها دو یا چند نوع مشابه

بلورند کسه ترکیب شیمیایی یکسانی دارند. * آشناترین مثال در این مورد وجود دو گانه کربن به صورت گرافیت و الماس است.

نخستین مثال برای چندشکلی در فلزات آهن است، زیرا تمام توانایی ما برای عملیات گرمایی فولاد و بهبود بخشیدن به خواص آن ناشی از این واقعیت است که اگر آهن گرم شود، شبکه آن از bcc به fcc تبدیل می‌شود. به علاوه این تغییر شبکه در موقع سرد کردن آهن برگشت پذیر است. در دمای اتاق عدد کوئوردیناسیون آهن bcc برابر ۸، ضریب فشردگی اتمی آن برابر ۰.۶۸ و شعاع اتمی آن برابر ۰.۱۲۴۱ nm است. آهن خالص در 912°C به fcc با عدد کوئوردیناسیون ۱۲، ضریب فشردگی اتمی ۰.۷۴ و شعاع اتمی ۰.۱۲۹ nm تبدیل می‌شود، [در 912°C (1673°F) شعاع اتمی آهن bcc به علت انبساط گرمایی ۰.۱۲۶ nm می‌شود].

بسیاری از ترکیبات دیگر نیز دارای دو یا چند شکل بلوری متفاوت اند. در واقع بعضی از این مواد، مانند SiC، تا ۲۵ حالت بلوری مختلف دارند که البته غیر عادی است. به طور کلی چندشکلیها در چگالی و سایر خواص اختلافاتی دارند. در فصلهای بعد در مورد تغییرات خواص و زمان لازم برای تبدیل یک حالت بلوری (فاز) به حالت دیگر بحث خواهد شد.

مثال ۳-۴-۱ آهن در 912°C (1673°F) از bcc به fcc تبدیل می‌شود. در این دما شعاع اتمی آهن در دو ساختار بلوری به ترتیب برابر ۰.۱۲۶ nm و ۰.۱۲۹ nm است. الف) درصد تغییر حجم، V/O ، پس از تغییر ساختار چقدر است؟ ب) درصد تغییر طول، L/O ، پس از تغییر ساختار چقدر است؟ [قابل ذکر است که طبق جدول ۲-۵-۱ و بخش ۲-۵ هر چه عدد کوئوردیناسیون بزرگتر باشد شعاع اتمی بزرگتر است.]

حل: مبنا: ۴ اتم آهن، یا دو سلول واحد آهن bcc، و یک سلول واحد آهن fcc. الف) در bcc، رابطه (۳-۲-۱)

$$\text{حجم} = 2a_{\text{bcc}}^3 = 2 \left[\frac{4(0.126)}{\sqrt{3}} \right]^3 = 0.0493 \text{ nm}^3$$

در fcc، رابطه (۳-۲-۳)

$$\text{حجم} = a_{\text{fcc}}^3 = \left[\frac{4(0.129)}{\sqrt{2}} \right]^3 = 0.0486 \text{ nm}^3$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{0.0486 - 0.0493}{0.0493} = -0.014 \quad (\text{تغییر } V/O = -1.4\%) \quad (\text{یا } -0.014)$$

* اگر چندشکلی در جامدات عنصری مثل فلزات دیده شود، گاهی واژه چندگون نیز در مورد آنها به کار می‌رود.

(ب)

$$\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right)^3 = 1 + \frac{\Delta V}{V}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt[3]{1 - 0.0014} - 1 = -0.00047 \quad (\text{تغییر } -0.471/0 \text{ یا } -0.00047)$$

توضیح. آهن تا دمای 912°C در اثر انبساط گرمایی منبسط می شود. در این دما انقباضی ناگهانی رخ می دهد. ادامه گرمایش موجب انبساط بیشتری شود شکل [۱۰-۱-۵ (الف)]
▲

مثال ۳-۴-۲ چگالی یخ و آب در 0°C به ترتیب 0.915 و 1.0005 Mg/m^3 (g/cm^3 یا) است درصد انبساط حجمی در حین انجماد آب چقدر است؟

حل: مبنا: 1 Mg

$$\text{حجم یخ} = 1.093 \text{ m}^3$$

$$\text{حجم مایع} = 0.9995 \text{ m}^3$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1.093 \text{ m}^3 - 0.9995 \text{ m}^3}{0.9995 \text{ m}^3}$$

$$= +0.0935 \quad (\text{یا } 9.35 \text{ v/o})$$

توضیح. با تغییرات اصلی که در حین انجماد و آب شدن اتفاق می افتد آشنا هستیم. اصولاً تغییرات چندشکلی مشابه اند، یعنی درون جامد، تغییری در ساختار به وجود می آید. این تغییر شامل تغییر حجم، چگالی و تقریباً تمام خواص فیزیکی دیگر است.
▲

۳-۵ شکل هندسی سلول واحد

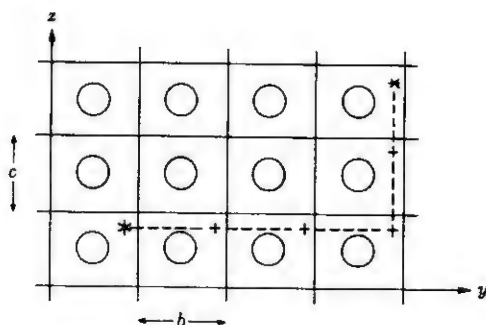
معمولاً بلور را در دستگاه مختصاتی نشان می دهند که محور x آن به طرف ma و محور y آن به طرف ra است و محور z آن به طرف sa است. بنابراین معمولاً مبدأ در طرف چپ، پایین و در قسمت عقب سلول واحد قرار می گیرد. جهت مخالف آن منفی است.

* در صورتی که دلیلی برای تغییر وجود داشته باشد، خود را به این قرارداد محدود نمی کنیم. ولی در توضیحات خود این قرارداد را در نظر می گیریم مگر اینکه به صورت دیگری گفته شود. جوابهای شما باید با در نظر گرفتن این قرارداد باشد مگر آنکه در آن نوآوری به کار رفته را شرح داده باشید.

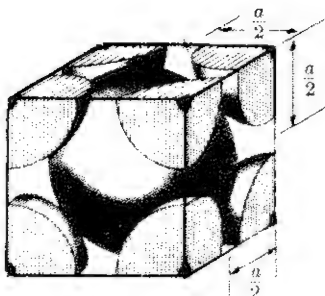
مکانهای سلول واحد. هر نقطه روی سلول واحد را می توان بر حسب ضرایبی در طول سه محور مختصات مشخص کرد، بنابراین مبدأ $0, 0, 0$ است. از آنجا که مرکز سلول واحد در $a/2, b/2, c/2$ قرار دارد، شاخص این مکان $1/2, 1/2, 1/2$ است. همیشه ضرایب مکانها بر حسب ابعاد سلولهای واحد بیان می شود. بنابراین بدون در نظر گرفتن سیستم بلوری مکعبی، چهار وجهی، مکعب مستطیل، و... دورترین رأس سلول واحد، $1, 1, 1$ است.

□ **انتقال.** با انتقال از هر نقطه ای درون سلول واحد به اندازه مضرب صحیح ثابت شبکه (a, b, c) محل معادلی در سلول واحد دیگر به دست می آید. بنابراین در شبکه دوبعدی شکل ۳-۵-۱، دو نقطه ای که با * مشخص شده اند با انتقال به اندازه $2b$ (در جهت y) و $2c$ (در جهت z) به دست آمده اند. واضح است که این نمونه غیر مکعبی (یا غیر مربعی) است. ولی در تمام سیستمهای بلوری برای به دست آوردن مکانهای معادل مضربهای صحیح به کار می روند.

در تعدادی از شبکه های فضایی، انتقالهای دیگری نیز وجود دارد. مثلاً در شبکه مکعبی مرکزدار، با هر انتقال $\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$ محل معادل دیگری به دست می آید. واضحترین آن، انتقال از یک گوشه به مرکز سلول به اندازه $\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$ است. ولی باید دانست دو مکانی که در شکل ۳-۵-۲ با علامت * مشخص شده اند نیز توسط $1/2, 1/2, -1/2$ به هم مربوط می شوند. یکی در مرکز ضلع بالایی عقبی قرار دارد و دیگری در مرکز وجه سمت راست. هر یک از آنها در نیمه راه بین دو اتم مجاور قرار دارند؛ هر یک برای چهار اتمی که در جهات 45° قرار دارند مرکز به حساب می آیند. همچنین، نقطه تماس بین دو اتم با هر نوع انتقال $\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$ تکرار می شود. این موضوع، تعریف کلی شبکه مکعبی مرکزدار است. شبکه مکعبی مرکزدار دارای مکانهای



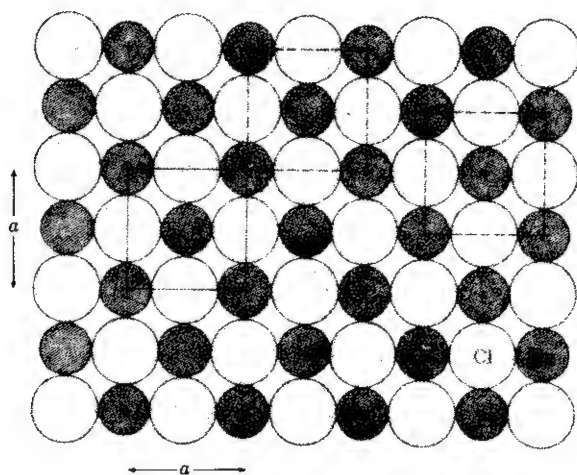
شکل ۳-۵-۱ انتقالهای واحد. انتقال تعداد صحیح ابعاد واحد، یعنی ثابتهای شبکه، به مکان معادلی منجر می شود که از هر جنبه با محل مبدأ یکسان است.



شکل ۳-۵-۲ انتقال در bcc. با انتقال از هر مکان به اندازه $\pm a/2$ ،
 $\pm a/2$ ، $\pm a/2$ مکانهای معادلی به دست می آید، مثل * تا *.

معادلی است که با انتقالهای $\pm a/2$ ، $\pm b/2$ ، $\pm c/2$ به هم مربوط می شوند. این امر
 دو مکان در هر سلول واحد به دست می دهد.

در شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار انتقالهای مختلفی وجود دارد. مثلاً شکل ۳-۵-۳
 صفحه گسترش یافته ای را به موازات سطح مکعبی NaCl (شکل ۱-۱-۳) نشان می دهد.
 با انتقال $\pm a/2$ ، $\pm a/2$ در دو بعد از سه بعد، نقطه دیگری به دست می آید که معادل
 اولی است (* تا *). در اینجا نیز نقطه اولیه را می توان به صورت تصادفی انتخاب کرد.
 اگر بخواهیم صفحات موازی با وجوه دیگر بلور شکل ۱-۱-۳ را امتحان کنیم، به بسط



شکل ۳-۵-۳ انتقال در fcc. با انتقال از هر مکان $a/2$ در دو جهت از
 سه جهت مشخصات مثلاً * تا *، مکانهای معادلی به دست می آیند.

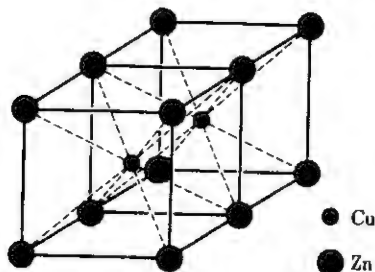
شرح کلی خود در مورد شبکه مکعبی بسادجوه مرکز داد نیاز داریم. شبکه مکعبی بسادجوه مرکز داد مکانهای معادلی دارد که با انتقال $0, \pm a/2, \pm b/2, \pm c/2$ و $0, \pm a/2, \pm b/2, \pm c/2$ به هم مربوط می شوند و در هر سلول واحد چهار مکان معادل (مکان اول و سه مکان دیگر) به ما می دهد.

شبکه مکعبی ساده. اگر چه در دومین جمله بخش ۳-۲ به شبکه مکعبی ساده اشاره کردیم، ولی آن را شرح ندادیم. برخلاف شبکه های bcc و fcc که به ترتیب دو و چهار مکان معادل در هر سلول واحد دارند. شبکه ساده در هر سلول واحد فقط يك مکان معادل دارد. این الزاماً بدان معنی نیست که چنین بلور هایی «ساده» اند، در حقیقت همیشه بیشتر از يك نوع اتم دارند که به نوبه خود به پیچیدگی آنها می افزاید. در عوض انتقال آنها به بردارهای صحیح محدود می شود. شکل ۳-۵-۲ ساختار ترکیب مکعبی ساده CsCl را نشان می دهد. با وجود آنکه این شکل ساختار bcc را تداعی می کند، ولی انتقال $a/2, a/2, a/2$ از گوشه به مرکز سلول واحد و نقطه مشابه را به هم مربوط نمی کند. یکی از آنها Cs^+ و دیگری Cl^- است. در نتیجه، این ساختار bcc نیست.

مثال ۳-۵-۱ الف) يك سلول واحد غیر مکعبی رسم کنید و مکان هایی را نشان دهید که دارای ضرایب زیر هستند.

$$0, 0, 0; 0, 0, \frac{1}{4}; \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}; \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, 0; 1, 1, 0; 1, 1, 1; 1, 1, 2$$

ب) فرض کنید سلول مکعب مستطیل است (تمام زاویه های محوری = 90°)، و $a = 0.270 \text{ nm}$, $b = 0.203 \text{ nm}$, $c = 0.363 \text{ nm}$. فاصله انتقال z بین مکان های $0, 0, 0$ و $1, 1, 1$ چقدر است؟



شکل ۳-۵-۴ ترکیب مکعبی ساده (برنج β'). هر اتم مس با هشت اتم روی همسایه است و هر اتم روی با هشت اتم مس همسایه است. شبکه مکعبی ساده است، زیرا مکان مرکز با مکان های گوشه معادل نیست. مثال این ساختار CsCl [شکل ۳-۵-۱ الف] است.

حل: الف) شکل ۳-۶-۱ الف) را ببینید.
ب) از آنجا که زوایای محوری 90° هستند،

$$z = \sqrt{[(1-0)(0.270 \text{ nm})]^2 + [(1-(-1))(0.403 \text{ nm})]^2} \\ \sqrt{+[(2-0)(0.363 \text{ nm})]^2} \\ = 1.118 \text{ nm}$$

توضیح. این روش تشریح مکانهای بلور، ما را به سلول واحد مبنا محدود نمی‌کند. ▲

مثال ۳-۵-۲ چهار نقطه زیر را در یک سلول واحد در نظر بگیرید

$$\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}; \quad \frac{7}{8}, \frac{3}{4}, \frac{1}{5}; \\ \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}; \quad 0.053, 0.055, 0.017$$

الف) برای شبکه مکعبی مرکزدار و برای هر چهار نقطه، مکان معادلی در سلول واحد مبنا معین کنید.

ب) برای شبکه مکعبی بـا وجوه مرکزدار و برای هر چهار نقطه، سـد مکان معادل در سلول واحد مبنا معین کنید.

جواب: الف) در شبکه مکعبی مرکزدار، انتقال بین مکانهای معادل $\pm 0.5a$ ، $\pm 0.5a$ ، $\pm 0.5a$ است. بنابراین

$$\text{برای } \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4} :$$

$$(0.25+0.5), (0.25+0.5), (0.75-0.5) = \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}$$

$$\text{برای } \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8} :$$

$$(0.125+0.5), (0.125+0.5), (0.125+0.5) = \frac{5}{8}, \frac{5}{8}, \frac{5}{8}$$

$$\text{برای } \frac{7}{8}, \frac{3}{4}, \frac{1}{5} :$$

$$(0.875-0.5), (0.75-0.5), (0.20+0.5) = \frac{3}{8}, \frac{1}{4}, 0.7$$

برای ۰٫۰۱۷، ۰٫۰۲۵، ۰٫۰۵۳:

$$۰٫۰۶۷، ۰٫۰۷۵، ۰٫۰۸۳ = (۰٫۰۱۷ + ۰٫۰۵)، (۰٫۰۲۵ + ۰٫۰۵)، (۰٫۰۵۳ - ۰٫۰۵)$$

ب) انتقال در شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار با تغییر $\pm ۰٫۰۵a$ و $\pm ۰٫۰۵a$ صورت می گیرد.

$$\text{برای } \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۴} \quad \frac{۳}{۴}, \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۴} \quad \frac{۳}{۴}, \frac{۳}{۴}, \frac{۳}{۴} \quad \frac{۳}{۴}, \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۴}$$

$$\text{برای } \frac{۱}{۸}, \frac{۱}{۸}, \frac{۱}{۸} \quad \frac{۵}{۸}, \frac{۱}{۸}, \frac{۵}{۸} \quad \frac{۵}{۸}, \frac{۵}{۸}, \frac{۱}{۸} \quad \frac{۱}{۸}, \frac{۵}{۸}, \frac{۵}{۸}$$

$$\text{برای } \frac{۱}{۵}, \frac{۳}{۲}, \frac{۷}{۸} \quad \frac{۳}{۸}, \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۵} \quad \frac{۳}{۸}, \frac{۳}{۴}, \frac{۰٫۰۷} \quad \frac{۷}{۸}, \frac{۱}{۴}, \frac{۰٫۰۷}$$

برای ۰٫۰۱۷، ۰٫۰۲۵، ۰٫۰۵۳:

$$۰٫۰۱۷، ۰٫۰۷۵، ۰٫۰۸۳ \quad ۰٫۰۵۳، ۰٫۰۶۷، ۰٫۰۲۵، ۰٫۰۸۳ \quad ۰٫۰۶۷، ۰٫۰۷۵، ۰٫۰۵۳$$

توضیح. این انتقالهای درون شبکه‌های مکعبی مرکزدار و مکعبی با وجوه مرکزدار به اینگونه سیستم مکعبی، مکعب مستطیل (یا چهاروجهی) باشد بستگی ندارد. Δ

مثال ۳-۵-۳ در شبکه NaCl فواصل بین مرکز یون سدیم و مراکز زیر را حساب کنید

الف) نزدیکترین همسایه آن؛

ب) نزدیکترین یون مثبت به آن؛

ج) دومین یون Cl^- نزدیک به آن؛د) سومین یون Cl^- نزدیک به آن؛

ه) نزدیکترین مکان معادل آن.

حل: به شکل ۱-۱-۳ مراجعه کنید. در پیوست (ب)، شعاع Na^+ و Cl^- به ترتیب $۰٫۰۹۷ \text{ nm}$ و $۰٫۱۸۱ \text{ nm}$ است (از آنجا که در هر یک $\text{CN} = ۶$ است)

$$a = 2(۰٫۰۹۷ + ۰٫۱۸۱ \text{ nm}) = ۰٫۵۵۶ \text{ nm}$$

$$\text{فاصله} = \frac{a}{۲} = ۰٫۲۷۸ \text{ nm} \quad (\text{الف})$$

$$\text{فاصله} = \sqrt{\left(\frac{a}{۲}\right)^2 + \left(\frac{a}{۲}\right)^2} = ۰٫۳۹۳ \text{ nm} \quad (\text{ب})$$

$$\text{فاصله} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} = 0.482 \text{ nm} \quad (\text{ج})$$

$$\text{فاصله} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + a^2} = 0.622 \text{ nm} \quad (\text{د})$$

ه) مشابه با (ب) است زیرا نزدیکترین یونهای Na^+ در مکانهای معادل قرار دارند و انتقال برابر است با $a/2, a/2, a/2$. \blacktriangle

مثال ۳-۵-۴ سزیم یدید (CsI) ساختاری مطابق شکل ۳-۵-۴ دارد. اگر شعاعهای سزیم و ید به ترتیب 0.172 nm و 0.227 nm باشد، ضریب فشردگی آن چقدر است؟

حل: قطر سلول واحد برابر است با $(2R + 2r)$. بنابراین

$$a = \frac{[2(0.172 + 0.227)]}{\sqrt{3}} = 0.461 \text{ nm}$$

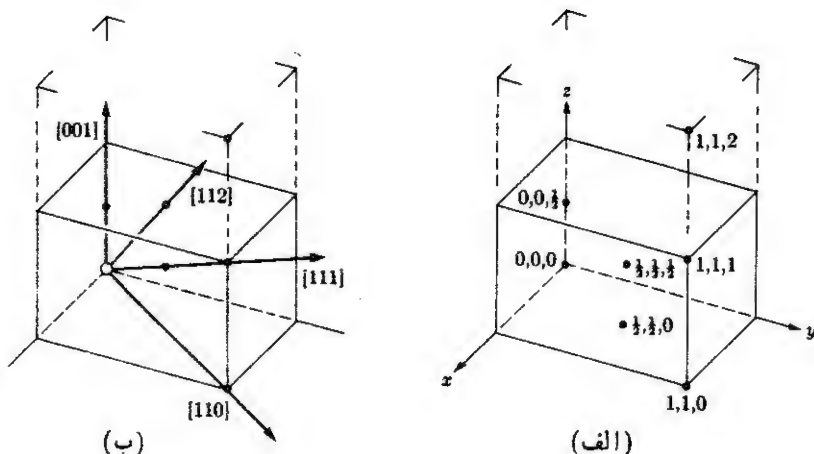
$$\text{ضریب فشردگی} = \left(\frac{4\pi}{3}\right) \frac{(0.172^3 + 0.227^3)}{(0.461)^3} = 0.72$$

توضیح. ضریب فشردگی بیشتر از مقداری است که از محاسبه طبق رابطه (۳-۲-۲) به دست می آید، زیرا فلز bcc اتم دومی (مختلفی) در مرکز مکعب ندارد. این شعاع یا شعاع به دست آمده از پیوست (ب) به اندازه عامل 0.97 فرق دارد، زیرا داده های پیوست مربوط به $\text{CN} = 6$ است، در صورتی که در اینجا $\text{CN} = 8$ است. \blacktriangle

۳-۶ جهات بلوری

در فصل بعد زمانی که رابطه خواص مختلف ماده با ساختار بلوری آن مورد بحث قرار می گیرد، لازم است که جهات ویژه بلوری مشخص باشند، زیرا بعضی از این خواص جهت دارند مثلاً ضریب کشسانی آهن bcc به موازات قطر مکعب بیشتر از مقدار آن به موازات ضلع مکعب است. برعکس نفوذپذیری مغناطیسی آهن به موازات ضلع مکعب سلول واحد بیشتر است.

جهات. جهات بلوری را با خطی که از مبدأ به مکانهایی با پایینترین شاخص صحیح وصل می شود، به سادگی نشان می دهند (شکل ۳-۶-۱). بنابراین جهت [۱۱۱] خطی است که مبدأ (۰، ۰، ۰) را به نقطه ۱، ۱، ۱ وصل می کند. با این حال باید دانست که این امتداد از نقطه ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ نیز عبور می کند. به همین ترتیب [۱۱۲] از ۱، ۱، ۱/۲ می گذرد ولی برای سهولت از اعداد صحیح استفاده می شود. می بینید که



شکل ۳-۶-۱ الف) مکانهای سلول واحد مکعب مستطیل. **ب)** جهات بلوری. مکان مبدأ معمولاً و نه لزوماً، در گوشه پایین سمت چپ در قسمت عقب است. به طور کلی از علامت $[uvw]$ برای نشان دادن جهت بخصوص و از علامت $\langle uvw \rangle$ برای نشان دادن جهات هم‌خانواده استفاده می‌شود این کار برای اجتناب از اشتباه کردن با علامت صفحات (hkl) صورت می‌گیرد. مکانها را بدون واحدهای محوری x و y و z نشان می‌دهند.

شاخصهای جهتها را در $[uvw]$ قرار داده از حروف u و v و w برای مشخص کردن شاخص جهات به ترتیب در جهات اصلی x ، y و z استفاده می‌شود. جهات موازی همیشه دارای شاخصهای یکسان اند. در نهایت ممکن است ضرایب منفی نیز داشته باشند که با علامت منفی در بالای عدد نشان داده می‌شود؛ جهت $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ دارای مؤلفه‌ای در جهت منفی محور z است.

زاویه بین جهات بلوری. در بعضی از محاسبات خاص (مثلاً تنشهای برشی تفکیک شده) لازم است زاویه بین دو جهت مختلف بلوری محاسبه شود. در اغلب محاسباتی که باید انجام دهیم، زاویه را می‌توان به سادگی به دست آورد. در شکل ۳-۶-۱ زاویه بین جهات $[110]$ و $[112]$ (یعنی $[110] \angle [112]$) برابر $\arctan \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ است. اگر به جای مکعب مستطیل، شبکه بلوری مکعبی باشد که در آن $a = b = c$ است، زاویه آن برابر $\arctan \frac{2a}{a\sqrt{2}}$ یا $\arccos \frac{a\sqrt{2}}{a\sqrt{6}}$ است. در واقع (فقط) برای بلورهای مکعبی می‌توان $[u'v'w'] \angle [uvw] \cos$ را به وسیله حاصلضرب عددی به دست آورده از روش اخیر در این کتاب بسیار استفاده شده است، زیرا اغلب محاسبات مربوط به بلورهای مکعبی قرینه است.

□ چگالی خطی. فاصله تکرار شونده بین مکانهای معادل در جهات مختلف و در شبکه‌های

مختلف تفاوت دارد. مثلاً در جهت [۱۱۱] فلز bcc، مکان معادل شبکه به فاصله هر $2R$ یا $a\sqrt{3}/2$ تکرار می‌شود. فاصله تکرار شونده در جهت [۱۱۰] بلور bcc برابر $a/\sqrt{2}$ است، ولی در fcc، $a/\sqrt{2}$ است. این مقادیر را می‌توان از شکل‌های ۳-۲-۳ و ۳-۲-۳ نیز به دست آورد.

از طرف دیگر، عکس این فواصل، چگالی خطی مکان‌های معادل است. بنابراین در جهت [۱۱۰] آلومینیم که دارای شبکه fcc با ضلعی برابر 0.405 nm است، چگالی خطی برابر با ۱ تقسیم بر $a/\sqrt{2}$ ، یا $\sqrt{2}/(0.405 \times 10^{-6} \text{ mm})$ است که مساوی $3.75 \times 10^6/\text{mm}$ می‌شود.

$$(3-6-1) \quad \text{چگالی خطی} = \frac{\text{عدد}}{\text{طول واحد}}$$

در فصل ۶ خواهیم دید که تغییر شکل در این جهات که بیشترین چگالی خطی مکان‌های معادل را دارند، بسیار آسانتر رخ می‌دهد.

در بیشتر فلزات در هر مکان شبکه یک اتم وجود دارد؛ بنابراین چگالی خطی آنها با چگالی خطی مکان‌های معادل برابر است. با وجود این، طبق مثال ۳-۶-۴ در بعضی بلورها این دو می‌توانند متفاوت باشند. در بلور مکعبی جهات زیر مشابه‌اند، به استثنای حالتی که در آن محورهای x ، y و z طور دیگری انتخاب شوند.

$$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}] \quad [1\bar{1}\bar{1}] \quad [\bar{1}1\bar{1}] \quad [11\bar{1}]$$

$$[\bar{1}\bar{1}1] \quad [\bar{1}11] \quad [1\bar{1}1] \quad [111]$$

هر خاصیت جهته‌داری* در این هشت جهت یکسان است. بنابراین برای مشخص کردن این جهات هم‌خانواده بلودی به جای نوشتن هر هشت جهت بهتر است آن را با $\langle 111 \rangle$ مشخص کنیم. لازم به تذکر است که در اینجا نماد به کار رفته $\langle \quad \rangle$ است.

مثال ۳-۶-۱ تمام جهات موازی دارای شاخصهای جهتی یکسان‌اند. خطوطی را در جهت $[1\bar{1}\bar{1}]$ ، از مکان‌های زیر رسم کنید (الف) $0, 0, 0$ ؛ (ب) $0, 1, 0$ ؛ و (ج) $1, 1, 0$.

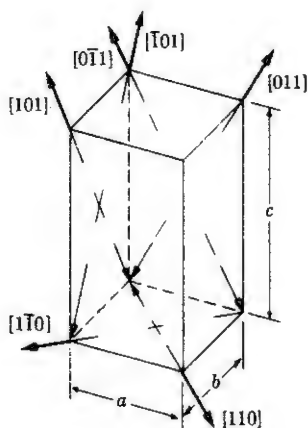
▲ حل: شکل ۳-۶-۲ (الف) را ببینید.

مثال ۳-۶-۲ جهات هم‌خانواده $\langle 101 \rangle$ در بلورهای زیر شامل چه جهات مجزایی‌اند؟ (الف) در بلور مکعبی؛ □ (ب) در بلور چهاروجهی.

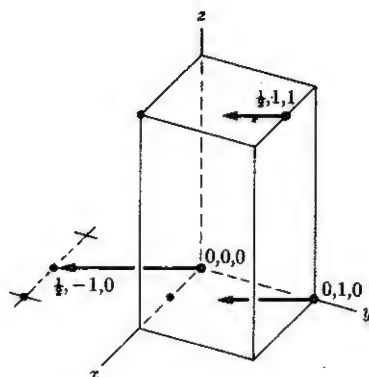
حل: (الف) در بلور مکعبی $a = a = a$. بنابراین

$$[101], [10\bar{1}], [\bar{1}01], [\bar{1}0\bar{1}], [011], [01\bar{1}], [0\bar{1}1], [0\bar{1}\bar{1}]$$

* مثلاً مدول یانگ، نفوذپذیری مغناطیسی، شاخص تفرق و ...



(ب)



(الف)

شکل ۳-۶-۲ جهات بلوری. (الف) $[1\bar{2}0]$ (مثال ۳-۶-۱ را ببینید)،
(ب) $\langle 101 \rangle$ (مثال ۳-۶-۲ (ب) را ببینید).

(ب) در سلولهای چهاروجهی $a = a \neq c$ [شکل ۳-۶-۲ (ب)]. بنابراین فقط شاخصهای u و v در $\langle uvw \rangle$ قابل جایجایی اند؛ شاخص w چنین نیست.

$$[101], [011], [\bar{1}01], [0\bar{1}1]$$

توضیح. جهات $[\bar{1}01]$ و $[10\bar{1}]$ را معمولاً دو صورت مختلف یک جهت در نظر می گیریم ولی، در صورت دلخواه می توان شاخصهای منفی هر یک از جهات بالا را نیز ذکر کرد.

مثال ۳-۶-۳ (الف) زاویه بین جهات $[111]$ و $[001]$ در بلور مکعبی چقدر است؟
(ب) $[111] \angle [\bar{1}\bar{1}1]$ چگونه؟

حل: باتوجه به مکعب شکل ۳-۶-۱ (ب)

$$\cos [111] \angle [001] = \frac{a}{a\sqrt{3}} \quad \text{(الف)}$$

$$[111] \angle [001] = 54.735^\circ$$

(ب) باتوجه به اینکه $[001]$ زاویه $[111] \angle [\bar{1}\bar{1}1]$ را نصف می کند، بنابراین

$$[111] \angle [\bar{1}\bar{1}1] = 2(54.735^\circ) = 109.47^\circ$$

یا، با استفاده از حاصلضرب عددی (چون بلور مکعبی است) داریم

$$\cos[111] \angle [\bar{1}\bar{1}\bar{1}] = -\frac{1}{3}$$

$$[111] \angle [\bar{1}\bar{1}\bar{1}] = 109.5^\circ$$

توضیح. این نتایج را با شکل ۲-۳-۳ (الف) که در آن هر چهار زاویه پیوند برابر 109.5° است مقایسه کنید. ▲

□ مثال ۳-۴-۴ ثابت شبکه ای الماس، a ، که بلوری مکعبی است برابر 357 nm است. (الف) چگالی خطی مکانهای معادل در امتداد $[111]$ چقدر است؟ (ب) چگالی اتمی چقدر است؟ حل: با استفاده از شکل ۲-۳-۴، اتم گوشه چپ بالا در قسمت عقب مکعب را به عنوان مبدأ در نظر بگیرید. (الف) درجهت $[111]$ فاصله تکرار شونده $0, 0, 0$ تا $1, 1, 1$ — برابر $a/\sqrt{3}$ یا 186 nm است بنابراین،

$$\text{چگالی خطی} = \frac{1}{0.186 \times 10^{-6} \text{ mm}} = 1.06 \times 10^6 / \text{mm}$$

(ب) در نقاط $0, 0, 0$ و $1/4, 1/4, 1/4$ اتمهایی وجود دارد بنابراین

$$\frac{2 \text{ اتم}}{a/\sqrt{3}} = 3.2 \times 10^6 / \text{mm}$$

توضیح. مکان اتم $1/4, 1/4, 1/4$ را می توان با مربوط کردن آن به چهار اتم همسایه اش در نقاط زیر تعیین کرد

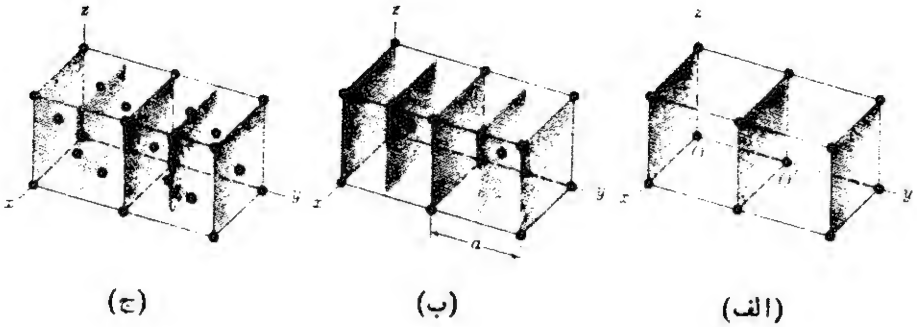
$$0, 0, 0 \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, 0 \quad \frac{1}{4}, 0, -\frac{1}{4} \quad 0, \frac{1}{4}, -\frac{1}{4}$$

▲

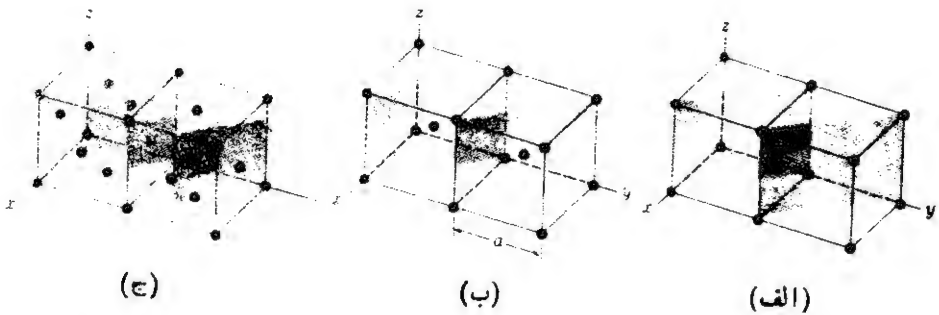
۳-۷ صفحه های بلوری

بلور شامل صفحه های اتمی است که بر خواص و رفتار ماده اثر می گذارند. بنابراین لازم است صفحه های مختلف داخل بلور مشخص شوند.

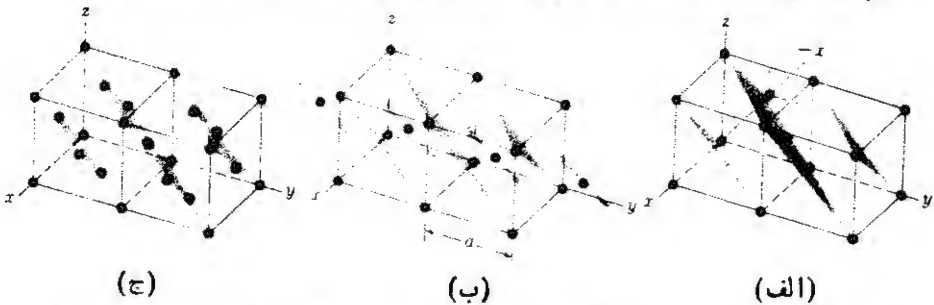
ساده ترین صفحه های شبکه ای آنهایی اند که سلول واحد را احاطه کرده اند و لی صفحات متعدد دیگری نیز وجود دارد. مهمترین آنها، در شکلهای ۳-۷-۱، ۳-۷-۲ و ۳-۷-۳ رسم شده اند؛ آنها را به ترتیب به صورت (010) ، (110) و $(\bar{1}\bar{1}1)$ نامگذاری می کنند، اعداد داخل پرانتزها (hkl) را شاخص میلر می نامند.



شکل ۳-۷-۱ صفحات (۰۱۰) در ساختارهای مکعبی. (الف) ساختار مکعبی ساده، (ب) bcc، (ج) fcc. [صفحات (۰۲۰) که جزء fcc، bcc هستند، با صفحات (۰۱۰) یکسان اند.]



شکل ۳-۷-۲ صفحات (۱۱۰) در ساختارهای مکعبی. (الف) ساختار مکعبی ساده، (ب) bcc، (ج) fcc. [صفحات (۲۲۰) که جزء fcc هستند، با صفحات (۱۱۰) یکسان اند.]



شکل ۳-۷-۳ صفحات ($\bar{1}11$) در ساختارهای مکعبی. (الف) مکعبی ساده، (ب) bcc، (ج) fcc. تقاطعهای منفی با علامت منفی روی شاخص نشان داده می شود. [صفحات (۲۲۲) که جزء bcc هستند، با صفحات ($\bar{1}11$) یکسان اند.]

شاخص میلر. با استفاده از صفحه تیره تر شکل ۳-۷-۴ می توان چگونگی تعیین اعداد (hkl) صفحه های بلوری را شرح داد. این صفحه محوره های x ، y ، و z را در نقاط a ، b ، c بره قطع می کند. شاخص میلر این صفحه به آسانی از معکوس کردن مختصات محل برخورد آن با محورها به دست می آید: (۱۱۲). صفحه روشن تر شکل ۳-۷-۴، صفحه (۱۱۱) است زیرا این صفحه محورها را در a ، b ، c قطع می کند. با توجه به شکل های قبل داریم

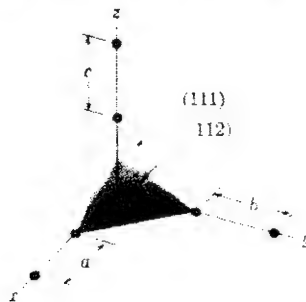
شاخص میلر	محل تقاطع	صفحه	شکل
(۰۱۰)	∞c ، b ، ∞a	وسط	۳-۷-۱ (الف)
(۱۱۰)	∞c ، b ، a	چپ	۳-۷-۲ (الف)
($\bar{1}$ ۱۱)	c ، b ، $-a$	وسط	۳-۷-۳ (الف)

باید دانست که تقاطع منفی را با علامت منفی در بالای شاخص میلر مربوط به آن مشخص می کنند. علاوه بر این دیده می شود که از پرانتز (hkl) برای نشان دادن صفحات (بدون ویرگول) استفاده می شود تا با جهاتی که در بخش ۳-۶ به صورت $[uvw]$ نشان داده شد، اشتباه نشود.

کلیه صفحه های موازی با شاخص های یکسانی مشخص می شوند. شکل ۳-۷-۱ (الف) این مطلب را نشان می دهد.

چون انتخاب مبدأ، O یا O' اختیاری است می توان از $(\frac{1}{a} \frac{1}{b} \frac{1}{c})$ یا (010)

به عنوان شاخص صفحه دست راستی استفاده کرد. چون گفتن و نوشتن شاخص های (010) آسانتر است بنابراین از آنها استفاده می شود و این کاملاً مجاز است زیرا سه صفحه



شکل ۳-۷-۴ شاخص های میلر. صفحه (۱۱۲) سه محور را در فواصل ۱، ۱/۲ و ۰/۱ واحد قطع می کند.

صفحه	مبدأ	تقاطع	شاخص میلر
راست	O	$\infty c, 2b, \infty a$	$(0 \frac{1}{2} 0)$
راست	O'	$\infty c, 1b, \infty a$	(010)
چپ	O'	$\infty c, -1b, \infty a$	$(0\bar{1}0)$

ها شورخورده از نظر هندسی کاملاً مشابه‌اند و در خلال تغییر شکل پلاستیکی (فصل ۶)، و تحت شرایط دیگر یکسان عمل می‌کنند. از این مطلب در شکل ۳-۷-۱ (ج) نیز می‌توان استفاده کرد:

صفحه	تقاطع	شاخص میلر
سومی از چپ	$\infty c, 1b, \infty a$	(010)
دومی از چپ	$\infty c, 0.5b, \infty a$	$(020) = (010)$

این صفحه‌ها نیز موازی و مشابه‌اند (ولی محورهای x و z را به فاصله $1/2$ قطع می‌کنند). معمولاً احتیاجی به مشخص کردن صفحات (010) از $(0 \frac{1}{2} 0)$ و (020) نیست. علاوه بر این در شکل ۳-۷-۲ (ج) صفحه (220) کاملاً مشابه با صفحه (110) است و صفحه $(\bar{2}22)$ همان صفحه $(\bar{1}\bar{1}1)$ است [شکل ۳-۷-۳ (ب)]. در نتیجه از شاخصهایی با کوچکترین مجموعه اعداد صحیح استفاده می‌کنیم. اکنون می‌توان تعریف دقیقتری از شاخص میلر ارائه داد. شاخص میلر عکس نقاط تقاطع صفحه با سه محور است که به صورت کسری نباشد و مضرب مشترك نداشته باشد.*

صفحه‌های هم‌خانواده. بسته به سیستم بلوری دو یا چند صفحه نیز ممکن است به یک خانواده از صفحه‌ها متعلق باشند. مثالی از صفحات چندگانه در سیستم مکعبی که صفحات هم‌خانواده یا شکل را تشکیل می‌دهند بدین قرار است:

$$\begin{array}{ccc} (100) & (010) & (001) \\ & & = \{100\} \\ (\bar{1}00) & (0\bar{1}0) & (00\bar{1}) \end{array}$$

* این تعریف در مورد فواصل بین صفحه‌ای (\dots, d_{hkl}, \dots) که در بخش ۳-۸ آمده، به کار نمی‌رود. زیرا این فواصل، صفحه نیستند بلکه فاصله بین جفت صفحات‌اند.

علامتی که برای صفحه‌های هم‌خانواده به کار می‌رود به صورت $\{hkl\}$ است. شکل ۱-۳-۱ صفحه‌های هم‌خانواده $\{100\}$ را نشان می‌دهد که شامل شش صفحه‌ای است که در بالا ذکر شد. کلیه وجه‌ها مشابه‌اند مگر علامت‌ها و جهت‌های محورهای به‌طور فرضی تغییر داده شود. خواننده باید با به حساب آوردن کلیه ترکیبات و تبدیلات صفحات مجزا، نشان دهد که خانواده $\{111\}$ شامل هشت صفحه و خانواده $\{110\}$ شامل ۱۲ صفحه است.

□ شاخصهای صفحات بلورهای منشور شش‌بر $(hkil)$. شاخص سه‌گانه میلر (hkl) ، می‌تواند کلیه صفحات ممکن را در هر بلوری مشخص کند. با این حال در سیستم‌های منشور شش‌بر اغلب چهارمحور استفاده می‌شود که سه محور آن هم‌صفحه‌اند [شکل ۱-۳-۳ (الف)]. انتخاب این چهار محور، چهار خط متقاطع و شاخصهای $(hkil)$ را به وجود می‌آورد. چهارمین رقم این شاخص (i) ، رقمی اضافی است که از نظر ریاضی با مجموع رقم‌های اول و دوم متناسب است

$$h+k=-i \quad (1-7-3)$$

کاربرد شاخصهای اختیاری $(hkil)$ ، معمولاً برای سیستم منشور شش‌بر مناسب است زیرا تقارن سیستم را به صورت روشنتری بیان می‌کند و گرچه شاخص اندکی زاید به نظر می‌رسد، ولی در مقالات علمی مربوط به منشورهای شش‌بر تقریباً همیشه بر شاخصهای $(hkil)$ ارجحیت دارد.

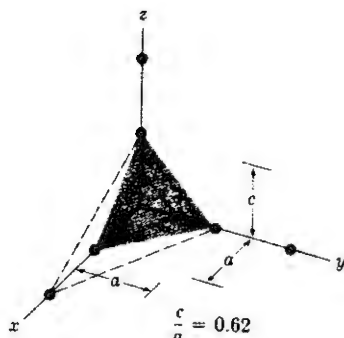
چگالی صفحه‌ای اتمها. بعداً وقتی که تغییر شکل پلاستیکی مورد بحث قرار می‌گیرد، لازم است نسبت به چگالی اتمهای صفحه بلور آگاهی داشته باشیم. مثال ۳-۷-۳ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان آن را از رابطه زیر به دست آورد

$$\text{چگالی صفحه‌ای} = \frac{\text{تعداد اتمها}}{\text{سطح واحد}} \quad (2-7-3)$$

به همان طریقی که در مورد چگالی خطی عمل شد می‌توان چگالی صفحه‌ای نقاط معادل را نیز محاسبه کرد.

مثال ۱-۷-۳ صفحه (111) را در سلول واحدی از بلور راست وجهی ساده‌ای که در آن $c/a = 0.62$ است، رسم کنید.

حل: شکل ۵-۷-۳ این صفحه را نشان می‌دهد (صفحه تیره شده). صفحه (111) سه محور را در فواصل واحد از مبدأ قطع می‌کند. اگر چه فاصله واحد در امتداد محور z کوتاه‌تر از فواصل واحد در امتداد محورهای x و y است.



شکل ۳-۷-۵ تقاطعهای غیر مکعبی (ساختر راست وجهی). صفحه تیره شده (۱۱۱) سه محور هر بلور را در فواصلی برابر با فاصله واحد از مبدأ قطع می‌کند. در هر حال چون c با a برابر نیست بنا بر این مقدار واقعی فاصله نقاط تقاطع از مبدأ یکی نیست (خط چین به مثال ۳-۷-۲ مربوط است).

مثال ۳-۷-۲ دو صفحه با شاخصهای (۱۲۲) روی محورهای مختصات شکل ۳-۷-۵ رسم کنید.

حل: نقاط تقاطع عکس (۱۲۲) یعنی a ، $-b$ و $-c$ است، که با خط چین داخلی مشخص شده‌اند. صفحه‌ای با تقاطع a ، $-b$ و $-c$ موازی این صفحه است و بنابراین همان شاخصها را دارد (خط چین بیرونی). ▲

مثال ۳-۷-۳ تعداد اتمهای واقع بر هر میلی متر مربع از صفحات (۱۰۰) و (۱۱۱) سرب (fcc) چقدر است؟

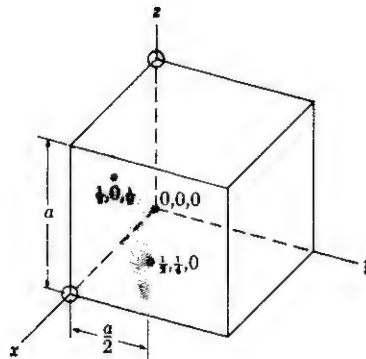
حل: (از پیوست ب) $\text{Pb} = 0.175 \text{ nm}$ شعاع

$$a_{\text{Pb}} = \frac{4R}{\sqrt{2}} = \frac{4(0.175 \text{ nm})}{1.414} = 0.495 \text{ nm}$$

شکل ۳-۷-۶ نشان می‌دهد که صفحه (۱۰۰) در هر وجه سلول واحد، دو اتم دارد

$$(100): \frac{\text{اتم}}{\text{mm}^2} = \frac{2 \text{ اتم}}{(0.495 \times 10^{-6} \text{ mm})^2} = 8.2 \times 10^{12} \text{ اتم/mm}^2$$

شکل ۳-۷-۷ (ب) نشان می‌دهد که صفحه (۱۱۱) حاوی سه تا یک‌ششم اتم در سطح مثلثی تیره شده، است



شکل ۳-۷-۸ صفحه (۱۲۱) مثال ۳-۷-۴ را ببینید.

مثال ۳-۷-۵ خطی که از تقاطع صفحات (۱۱۱) و (۱۱۲) به دست می آید دارای چه جهتی است؟

حل: به شکل ۳-۷-۴ مراجعه کنید: $[1\bar{1}0]$ ، (یا $[\bar{1}10]$).

توضیح. با بررسی شکل، خط تقاطع به صورت ساده تری به دست می آید ولی می توان آن را با ضرب برداری شاخصهای صفحات نیز به دست آورد.

□ مثال ۳-۷-۶ با مراجعه به شکل ۳-۳-۱ (الف)، شاخصی برای صفحه روبروی خواننده پیدا کنید.

حل:

محور:	a_1	a_2	a_3	c
تقاطع:	۱	∞	-۱	∞

بنابراین، شاخص $(hkil)$ آن $(10\bar{1}0)$ است، زیرا عکس این ارقام را به کار می بریم.

توضیح. اگر صورت دیگر آن، مثل شکل ۳-۳-۱ (ب)، را به کار می بردیم، شاخص (hkl) آن (100) می شد. شاخص اضافی، i ، طبق رابطه (۳-۷-۱) به h و k مربوط می شود.

مثال ۳-۷-۷ صفحات مجزایی را که به خانواده $\{111\}$ بلورهای مکعبی تعلق دارند ذکر کنید.

حل:

(111)	$(\bar{1}11)$	$(1\bar{1}1)$	$(11\bar{1})$
$(\bar{1}\bar{1}1)$	$(1\bar{1}\bar{1})$	$(\bar{1}1\bar{1})$	$(\bar{1}11)$

توضیح. در عمل (به جای ۸) فقط ۴ مجموعه صفحه وجود دارد، زیرا صفحات مجموعه دوم با صفحات مجموعه اول موازی اند. ولی برخلاف جهات منفی (مثال ۳-۶-۲)، ما معمولاً صفحات افزونه را ذکر می کنیم زیرا هشت صفحه (در این مورد) حجمی را تشکیل می دهند و شکلی بلوری به وجود می آورند. شکل بلوری برای {۱۱۱}، دوهرم است. ه

□ ۳-۸ تفرق اشعه ایکس

بررسیهای تجربی بسیار کامل ساختارهای بلوری مورد بحث، از طریق تفرق اشعه ایکس در دسترس ما قرار گرفته است. اگر امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا، طوری انتخاب شوند که دارای طول موجی بزرگتر از فواصل بین صفحه‌ای بلورها باشند، این امواج طبق قوانین فیزیکی کاملاً مشخصی تفرق می یابند. با استفاده از زوایای تفرق می توان با دقت زیاد ساختارهای بلوری را مشخص کرد. به همین ترتیب با استفاده از آن می توان فواصل بین صفحه‌ای (و بنا بر این شعاع اتمی) فلزات را تا چهار رقم بامعنی و حتی دقیقتر، محاسبه کرد. در اینجا ابتدا فواصل بین صفحات را بررسی می کنیم، سپس به موضوع تفرق می پردازیم.

فواصل بین صفحه‌ای. همان طور که در بخش ۳-۷ گفته شد صفحات موازی دارای نشانهای (hkl) یکسان اند. بنابراین علاوه بر صفحات متعدد (۱۱۰) شکل ۳-۷-۲، صفحه دیگری نیز وجود دارد که مستقیماً از مبدأ می گذرد. در نتیجه اگر فاصله قائم بین صفحه مبدأ و صفحه (۱۱۰) مجاور اندازه گرفته شود فاصله بین صفحه‌ای d به دست می آید. دیده می شود که در ساختارهای مکعبی ساده شکلهای ۳-۷-۱، (الف)، (الف) و ۳-۷-۳ (الف) فواصل بین صفحه‌ای d_{110} ، d_{111} به ترتیب برابر $a/\sqrt{2}$ و $a/\sqrt{3}$ است یعنی برای d_{110} در هر وجه، a یک فاصله؛ برای d_{111} در هر قطر وجه، $a/\sqrt{2}$ دو فاصله و برای d_{111} در هر قطر مکعب، $a/\sqrt{3}$ سه فاصله بین صفحه‌ای موجود است. فواصل بین صفحه‌ای d در بلورهای مکعبی را می توان به صورت قاعده کلی زیر فرمولبندی کرد

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (۳-۸-۱)$$

که در آن a ثابت شبکه‌ای و h ، k و l شاخصهای صفحات اند. * فواصل بین صفحه‌ای

* معکوس بودن شاخصهای میلر، چنین محاسبات ساده شده‌ای را ممکن می سازد. همچنین ضرب برداری شاخصهای میلر برای دو صفحه متقاطع، امتداد خط تقاطع آنها را به دست می دهد. در نهایت شرط قرار گرفتن هر امتداد در صفحه، این است که حاصل ضرب حسابی شاخصهای آن در شاخصهای صفحه برابر صفر باشد. به طور خلاصه، دلایلی وجود دارد که استفاده از طریقه معکوس کردن اعداد در شاخصهای میلر را توجیه می کند.

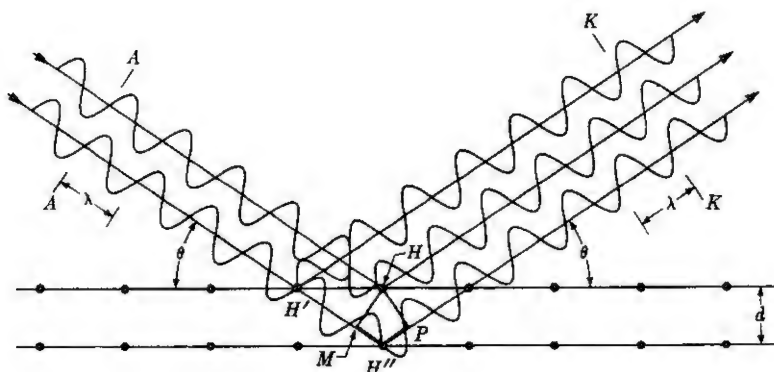
بلورهای غیر مکعبی را نیز می توان با روابطی که به رابطه ۱-۸-۳ مربوط می شوند نشان داد، ولی برای این منظور باید متغیرهای جدول ۱-۱-۳ را نیز در نظر گرفت.

قانون براگ. وقتی اشعه ایکس به ماده بلوری برخورد کند صفحات اتمی (یا یونی) داخل بلور باعث تفرق آن خواهد شد. زاویه تفرق، θ ، به طول موج اشعه ایکس، λ ، و فاصله بین صفحات، d ، بستگی دارد

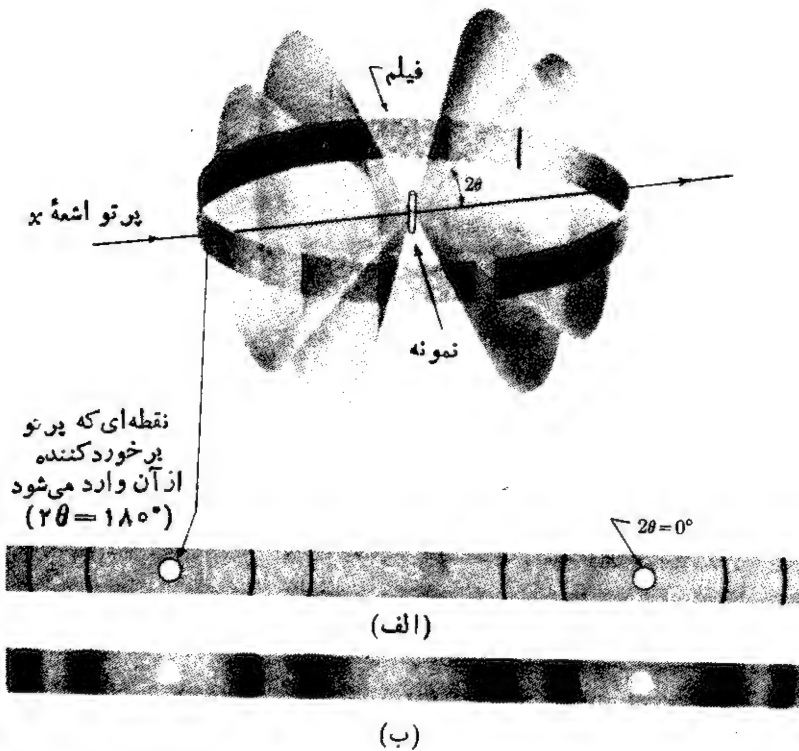
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (۲-۸-۳)$$

صفحات اتمی موازی شکل ۱-۸-۳ را که باعث تفرق موج شده است در نظر بگیرید. امواج ممکن است از اتمهای واقع در H و H' منعکس شوند و در K هم فاز باقی بمانند. در هر صورت اشعه ایکس نه تنها از صفحه سطحی بلکه از زیر صفحات مجاور نیز منعکس می شود. برای اینکه این بازتابها هم فاز باقی بمانند و همدس باشند فاصله $MH''P$ باید مساوی با مضرب صحیحی از طول موج باشد. مقدار n در رابطه (۲-۸-۳) تعداد صحیح شعاعهایی است که در فاصله $MH''P$ وجود دارد.

تحلیل تفرق. متداولترین روش تحلیل تفرق اشعه ایکس، استفاده از گورد بسیار ریز ماده مورد نظر است. این گورد را با سیمان پلاستیکی می آمیزند و رشته بسیار نازکی می سازند و آن را در مرکز دوربین مدوری (شکل ۲-۸-۳) قرار می دهند. دسته ای اشعه ایکس به گورد تابانده می شود. چون تعداد بسیار زیادی از ذرات گورد که کلیه جهات ممکن را دارند تحت تابش قرار می گیرند، بنابراین اشعه تفرق یافته به صورت پرتوهای مخروطی با زاویه θ از اشعه اولیه حاصل می شود. (طبق شکل ۱-۸-۳ پرتو تفرق یافته نسبت به پرتو اولیه با زاویه ای برابر θ منحرف شده است.)



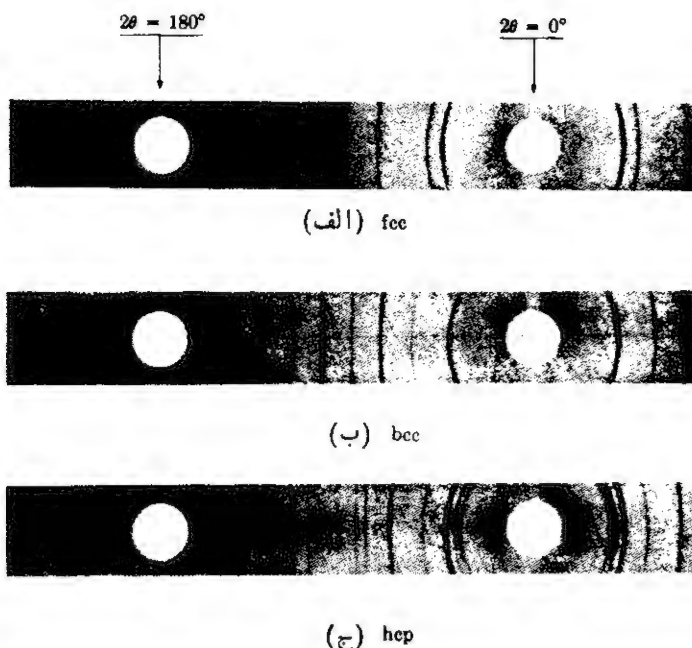
شکل ۱-۸-۳ تفرق اشعه ایکس.



شکل ۳-۸-۲ اثر تفرق اشعه ایکس روی فیلم عکسی. زاویه 2θ دقیقاً براساس فاصله صفحات اتمی، d ، و طول موج λ طبق رابطه (۳-۸-۲) تعیین می‌شود. هر یک از مخروطهای انعکاسی، در دومحل روی حلقه فیلم ثبت می‌شود.

مخروط تفرق یافته در دومحل روی فیلم داخل دوربین اثر می‌گذارد؛ که هر کدام نسبت به خطی که دوسوراخ را بهم وصل می‌کند زاویه مرکزی 2θ می‌سازد. برای هر مقدار d_{hkl} فاصله بین صفحه‌ای مخروط (یا یک جفت خط تفرق) جداگانه‌ای وجود دارد. بنابراین خطوط تفرق را می‌توان تعیین کرد و با استفاده از رابطه (۳-۸-۲) فاصله بین صفحه‌ای را حساب کرد. کلیه فلزات fcc مجموعه خطوط تفرق مشابهی دارند ولی مقدار 2θ در آنها متفاوت است، زیرا ثابت شبکه‌ای متفاوتی دارند. مثلاً $a_{Cu} = 0.35615 \text{ nm}$ ، $a_{Al} = 0.4049 \text{ nm}$ ، $a_{Pb} = 0.495 \text{ nm}$. بنابراین می‌توان فلزات مختلف fcc را از هم تشخیص داد.

در شکل ۳-۸-۳ فیلمهای تفرق اشعه ایکس مس (fcc)، تنگستن (bcc) و روی (hcp) را مشاهده می‌کنیم. بلافاصله مشخص می‌شود که ترتیب خطوط تفرق در این سه



شکل ۳-۸-۳ تفرق اشعه ایکس برای الف) fcc؛ ب) تنگستن bcc؛ و ج) روی hcp. ساختار بلوری و ثابتهای شبکه را می توان با استفاده از چنین الگوهای محاسبه کرد.

نوع بلور متفاوت است. چون بررسی این اختلافات در اینجا ممکن نیست باید به سادگی گفت که با داشتن «اثر انگشت» های متفاوت نه تنها می توان اندازه ثابتهای شبکه ای را با پیشینه دقت تعیین کرد بلکه شبکه بلوری را نیز می توان تشخیص داد. تفرق اشعه ایکس وسیله پر قدرتی در مطالعه ساختار داخلی مواد است.

مثال ۳-۸-۱ اشعه ایکس با طول موج نامعلوم به وسیله مس (fcc) با ثابت شبکه ای $a = 0.357 \text{ nm}$ به اندازه 43.4° متفرق می شود. آزمایشات دیگری نشان داده است که این خط تفرق برای مس از خطوط درجه اول ($n=1$) و برای d_{111} است. الف) طول موج اشعه ایکس چقدر است؟ ب) همین اشعه را برای تحلیل تنگستن (bcc) به کار برده اند. در فواصل صفحه ای d_{010} زاویه 2θ را برای خطوط تفرق درجه دوم ($n=2$) پیدا کنید.

حل: الف) از آنجا که $2\theta = 43.4^\circ$ ؛ با استفاده از روابط (۳-۸-۱) و (۳-۸-۲) داریم

$$\begin{aligned} (1) \lambda &= 2 \left[\frac{0.3615 \text{ nm}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}} \right] \sin 21.7^\circ \\ &= 0.1543 \text{ nm} \end{aligned}$$

(ب) از پیوست (ب)

$$R_w = 0.1367 \text{ nm}$$

از رابطه (۱-۲-۳)

$$a_w = 4(0.1367 \text{ nm})/\sqrt{3} = 0.3157 \text{ nm}$$

از روابط (۱-۸-۳) و (۲-۸-۳)

$$\sin \theta = \frac{2(0.1543 \text{ nm})(\sqrt{0+1+0})}{(2)(0.3157 \text{ nm})}$$

$$2\theta = 58.4^\circ$$

توضیح. تفرق درجه دوم d_{010} معادل است با تفرق درجه يك d_{020} یعنی فاصله عمودی مبدأ تا صفحه‌ای که محورهای x, y و z را به ترتیب در $\infty, 1/2$ و ∞ قطع می‌کند. صحت این را می‌توان با استفاده از روابط (۱-۸-۳) و (۲-۸-۳) ثابت کرد. فواصل بین صفحه (d_{hkl}) کلیه صفحات هم‌شکل برابر است؛ مثلاً در سیستم مکعبی $d_{100} = d_{010} = d_{001}$ است. ▲

مرور و بررسی مطالب

در فصل ۲ پیوند بین هراتم و اتمهای همسایه و نیز کوئوردیناسیون حاصل بررسی شده در این فصل با بررسی نظم هندسی پرده‌تر قدم دیگری برای درک ساختار داخلی مواد برداشته شد. چون کلیه اتمهای همسان کوئوردیناسیون مشابهی دارند بنابراین تکرار متوالی يك الگو در ماده قابل انتظار است.

خلاصه

جامدات بلوری را می‌توان به سلولهای واحدی تقسیم کرد که هر کدام تمام خواص کوئوردیناسیون اتمی موجود در کل بلور را دارند. مکانهای معادل در هر سلول واحد همسایه‌های یکسان در جهات یکسان و در فواصل یکسان دارند. هنگام بررسی خواص

مواد این مطلب بررسی ساختار داخلی مواد را آسان می‌کند زیرا فقط باید سلول واحد را بررسی کنیم.

بر اساس شکل فضایی سلول واحد (ابعاد و زوایای محورهاهای سلول واحد) هفت سیستم بلوری وجود دارد. این هفت سیستم بر اساس آرایش داخلی مکانهای معادل در سلول واحد دارای شبکه‌های متعددی هستند. در این فصل بیشتر به ساختار مکعبی مرکزدار (bcc)، مکعبی با وجوه مرکزدار (fcc) و ساختار عمومی شبکه منشور شش بر موسوم به منشور شش بر فشرده (hcp) توجه شده است. در هنگام لزوم شبکه‌های راست و چپ مرکزدار (bct) و مکعبی ساده (sc) نیز بررسی شده‌اند. هر نقطه درون شبکه مکعبی مرکزدار از مکان معادل خود با انتقال $\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$ جدا می‌شود. هر نقطه درون شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار از سه مکان معادل دیگر خود با انتقالهای $\pm 1/2, \pm 1/2, 0$ ، $0, \pm 1/2, \pm 1/2$ ، $\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$ جدا می‌شود. نقاط درون شبکه ساده در داخل آن سلول واحد تکرار نمی‌شوند.

جهات بلوری بر اساس ابعاد سلول واحد شاخص گذاری می‌شوند. بنا بر این جهت [۱۱۱] خطی است که بدون توجه به سیستم بلوری، مبدأ $0, 0, 0$ را به مرکز سلول واحد متصل می‌کند و از گوشه دیگری می‌گذرد. کلیه جهات هم خانواده $\{hkl\}$ شامل کلیه جهات مشابه است، به استثنای موقعی که محورهاهای مختصات به طور اختیاری به صورت دیگری انتخاب شوند.

صفحات بلوری با عکس مختصات محل تقاطع صفحه با محور (پس از حذف کسر ها و تبدیل آنها به عدد صحیح) شاخص گذاری می‌شوند. ما بیشتر به صفحات $\{100\}$ ، $\{110\}$ و $\{111\}$ توجه می‌کنیم بنا بر این خواننده باید با مطالب زیر آشنایی کافی پیدا کند:

۱. هر صفحه‌ای که از خانواده $\{100\}$ باشد با دو محور مختصات موازی است و محور سوم را قطع می‌کند؛

۲. هر صفحه‌ای که از خانواده $\{110\}$ باشد با یک محور موازی است و دو محور دیگر را در مختصات مساوی قطع می‌کند؛ و

۳. صفحاتی که از خانواده $\{111\}$ باشند هر سه محور را در نقطه‌ای با مختصات مساوی قطع می‌کنند.

چون این کتابی برای درس بلورشناسی نیست در مورد چگونگی به وجود آمدن ساختارهای بلوری و تشخیص آنها در آزمایشگاه بحث زیادی نکردیم، ولی متذکر شدیم که در بررسی شبکه بلوری از تفرق اشعه ایکس استفاده می‌شود. زوایای تفرق به وسیله قانون براگ تحلیل می‌شوند. تعداد اندکی از مشخصات ساختاری نیز وجود دارد که آنها را می‌توان با اطمینان بیشتری از این پارامترهای بلوری، اندازه گیری کرد.

سوالات تشریحی

۱. منظور از نظم پراگنده چیست؟

۲. زمینی پوشیده از کاشی را در نظر بگیرید، به طور تصادفی نقطه‌ای روی آن انتخاب کنید، توضیح دهید که منظور از «فاصله تکرار شونده» چیست؟
۳. سیستم‌های بلوری مختلف را نام ببرید و مشخصات متمایز کننده هر یک را ذکر کنید.
۴. گوشه سلول واحد مکعبی با چند سلول واحد مشترک است؟ گوشه سطح مستطیل شکلی از یک صفحه به چند «سطح واحد» تعلق دارد؟
۵. به کمک شکل ۳-۲-۴، نشان دهید که برای fcc ، $CN = ۱۲$ است.
۶. کاغذ دیواری با اشکال پیچیده را در نظر بگیرید و نقطه‌ای تصادفی روی آن انتخاب کنید. سه مکان معادل پیدا کنید. فواصل انتقالی بین مکانهای معادل چقدر است؟
۷. برای الگوهای دوبعدی پنج سطح واحد مختلف وجود دارد: مربع ساده، مستطیل ساده، مستطیل با اضلاع مرکزدار، متوازی‌الاضلاع و شش‌بر. هر کدام چند مکان معادل دارند؟ چرا مربع با اضلاع مرکزدار ذکر نشد؟ مستطیل با اضلاع مرکزدار گاهی لوزی ساده نامیده می‌شود. در این باره شرح دهید.
۸. شبکه fcc را می‌توان به صورت شبکه لوزوجهی نیز نشان داد. الف) دوشبکه چگونه باهم مقایسه می‌شوند؟ ب) زاویه رأس آن چقدر است؟ ج) نسبت حجمهای سلولهای واحد چقدر است؟ د) چرا fcc را به لوزوجهی ترجیح داده‌ایم؟
۹. در میان شبکه‌های سه‌بعدی، bcc و bct (یعنی راست‌وجهی مرکزدار) و نیز fcc را شرح دادیم ولی از fcc صحبتی به میان نیامد. علت آن را شرح دهید.
۱۰. نسبت حجم دوسو سلول واحد شش‌بر شکل ۳-۳-۱ چقدر است؟ نسبت تعداد مکانهای معادل آنها چقدر است؟
۱۱. ابعاد و «شکل» حفره‌هایی را که مراکز آنها در مکانهای $۱/۲$ ، $۱/۲$ ، $۱/۲$ و $۱/۴$ ، $۱/۴$ ، $۱/۴$ فلز bcc قرار دارند مقایسه کنید.
۱۲. ابعاد و «شکل» حفره‌هایی را که مراکز آنها در مکانهای $۱/۲$ ، $۱/۲$ ، $۱/۲$ و $۱/۴$ ، $۱/۴$ ، $۱/۴$ فلز fcc قرار دارند مقایسه کنید.
۱۳. الماس در مقایسه با گرافیت برای پایدار بودن به فشار بیشتری احتیاج دارد. این مطلب چه چیزی را در مورد چگالی الماس و گرافیت نشان می‌دهد؟
۱۴. کبالت در حین گرم شدن در $۱۱۲۵^{\circ}C$ از hcp به fcc تبدیل می‌شود. تغییر حجم آن الف) در مقایسه با آهن چگونه است، آهن در حین گرم شدن منقبض می‌شود و از شکل مربوط به دمای پایین به شکل مربوط به دمای بالا تبدیل می‌شود (مثال ۳-۴-۱)؛ و ب) در مقایسه با تیتانیوم چگونه است، تیتانیوم در حین سرد شدن منقبض شده از شکل مربوط به دمای بالا به شکل مربوط به دمای پایین تبدیل می‌شود (مسئله ۳-۴-۳).
۱۵. شکل ۳-۲-۴ نشان می‌دهد که آهن fcc را می‌توان راست‌وجهی مرکزدار (bct) با $c/a = ۱.۴۱۴$ نامید. چرا به جای bct از fcc استفاده می‌شود؟

۱۶. قلع خاکستری ساختار الماس (شکل ۲-۲-۴) را دارد. قلع سفید ساختار راست‌وجهی مرکز‌داری دارد که در آن اتمهای قلع در نقاط زیر قرار دارند

$$\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, 0 \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4} \quad \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2} \quad 0, 0, 0$$

سلول واحد آن را رسم کنید. نشان دهید که مکانهای دوم و سوم پیشگفته معادل نیستند ولی مکانهای دوم و چهارم معادل‌اند.

۱۷. چند جهت در خانواده $\langle 01\bar{2} \rangle$ سیستم بلوری مکعبی وجود دارد؟ (معمولا جهات $[uvw]$ و $[\bar{u}\bar{v}\bar{w}]$ را یکی در نظر می‌گیریم، زیرا منفی کردن هر سه شاخص همان خط را ولی در جهت عکس نشان می‌دهد. یعنی $[\bar{u}\bar{v}\bar{w}] = -[uvw]$).

۱۸. □ سؤال ۱۷ را برای بلور راست‌وجهی تکرار کنید (به یاد داشته باشید که در راست‌وجهی $c \neq a$). بنا بر این در این مورد برخلاف سیستم مکعبی نمی‌توانیم ۲ را به صفر یا یک تبدیل کنیم).

۱۹. سلول واحد hcp شکل ۳-۳-۲ (ب) را می‌توان به صورت شبکه لوزی شکل نیز کشید. [به شکل ۳-۳-۱ (ب) رجوع کنید.] در هر سلول واحد چند مکان معادل وجود دارد؟ (آیا مکانهایی که انتخاب کرده‌اید همسایه‌های یکسانی در جهات یکسان و در فاصله یکسان دارند؟ اگر ندارند مکانهای معادل نیستند. مسئله ۳-۵-۱۰ را حل کنید.)
۲۰. کدامیک از جهات زیر در صفحه (۱۱۰) قرار دارد؟

$$[8\bar{8}9] \quad [1\bar{1}2] \quad [001] \quad [1\bar{1}0] \quad [11\bar{2}]$$

۲۱. □ نشان دهید که حاصلضرب عددی $[uvw]$ و (hkl) ، در صورتی که جهت مذکور روی صفحه قرار گرفته باشد، صفر است.

۲۲. □ جهت $[111]$ بر صفحه (111) بلور مکعبی عمود است، ولی در بلور راست‌وجهی عمود نیست. چرا؟

۲۳. □ با استفاده از شکل ۳-۷-۲ (ج) ثابت کنید که تفرق درجه دوم ($n=2$) برای d_{110} برابر است با تفرق درجه یک ($n=1$) برای d_{220} .

۲۴. فشردگی اتمی در فلزات به اندازه اتم بستگی ندارد. تحت چه شرایطی ضریب فشردگی برای ماسه موجود در یک مخزن به اندازه دانه‌های ماسه بستگی ندارد؟

۲۵. همان‌طور که در بخش ۳-۱ ذکر شده، بخش عمده‌ای از فلزات مکعبی‌اند؛ ولی تعداد کمی از جامدات مولکولی ساختار مکعبی دارند. دلیل آن را شرح دهید.

۲۶. □ (۲۰) را مشابه با (۱۰) در نظر گرفتیم؛ ولی بین d_{10} و d_{20} تفاوت قائل شدیم. چرا؟

مسائل

۱-۱-۳ سلول واحد آلومینیم مکعبی با $a = 0.4049 \text{ nm}$ است. با استفاده از چگالی آن محاسبه کنید که چند اتم در هر سلول واحد وجود دارد.

جواب: ۴

۲-۱-۳ در هر سلول واحد روی دو اتم وجود دارد، حجم سلول واحد آن چقدر است؟

۳-۱-۳ قلع راست وجهی با $c/a = 0.546$ است. در هر سلول واحد آن ۴ اتم وجود دارد. الف) حجم سلول واحد چقدر است؟ ب) ابعاد شبکه چقدر است؟

جواب: الف) $c = 0.318 \text{ nm}$ ، ب) $a = 0.582 \text{ nm}$

۴-۱-۳ صفحه نازکی از طلا دارای ضخامت 0.08 mm و سطح 70 mm^2 است. الف) طلا ساختاری مکعبی با $a = 0.4076 \text{ nm}$ دارد. در این صفحه چند سلول واحد وجود دارد؟ ب) اگر چگالی برابر $19.32 \text{ Mg/m}^3 (= 19.32 \text{ g/cm}^3)$ باشد، جرم هر سلول واحد چقدر است؟

۱-۲-۳ ضریب فشردگی اتمی فلز bcc را محاسبه کنید.

جواب: ۰.۶۸

۲-۲-۳ حجم سلول واحد کرم در مثال ۱-۱-۳ برابر، $10^{-30} \times 24$ یا 0.024 nm^3 است. براساس داده‌هایی که در آن مسئله به کار رفته، به علاوه $0.68 = \text{PF}_{\text{bcc}}$ ، شعاع اتم کرم را محاسبه و با مقدار ذکر شده در پیوست (ب) مقایسه کنید.

۳-۲-۳ نقره fcc و شعاع اتمی آن 0.1444 nm است. طول ضلع سلول واحد آن چقدر است؟

جواب: 0.4082 nm

۴-۲-۳ نیکل fcc است و چگالی آن $8.9 \text{ Mg/m}^3 (= 8.9 \text{ g/cm}^3)$ است. الف) حجم هر سلول واحد براساس چگالی چقدر است؟ ب) از جواب قسمت (الف)، شعاع اتم نیکل را محاسبه کنید. این مقدار را با مقدار ذکر شده در پیوست (ب) مقایسه کنید.

۵-۲-۳ تیتانیم در دمای بالا، bcc و شعاع اتمی آن 0.145 nm است. الف) ضلع سلول واحد چقدر است؟ ب) چگالی را محاسبه کنید.

جواب: الف) 0.335 nm ، ب) $4.22 \text{ Mg/m}^3 (= 4.22 \text{ g/cm}^3)$

۶-۲-۳ سرب fcc است و شعاع اتمی آن $1.75 \times 10^{-10} \text{ m}$ است. حجم سلول واحد آن چقدر است؟

۷-۲-۳ چگالی تنگستن را از سایر داده‌های پیوست (ب) به دست آورید.

جواب: $19.41 \text{ Mg/m}^3 (= 19.41 \text{ g/cm}^3)$

۸-۲-۳ ساختار باریم، با چگالی $3.6 \text{ Mg/m}^3 (= 3.6 \text{ g/cm}^3)$ ، bcc است. الف) فاصله بین مراکز نزدیکترین آنها را محاسبه کنید؛ ب) اندازه ضلع سلول واحد چقدر است؟ (عدد اتمی آن ۵۶ و وزن اتمی آن 137.3 amu است.)

۹-۲-۳ اکسید منیزیم (MgO) همان ساختار NaCl (شکل ۱-۱-۳) را دارد. الف) ثابت شبکه، a ، آن چقدر است؟ ب) چگالی آن چقدر است؟ (یادداشت: MgO ترکیبی یونی است؛ بنابراین باید به جای شعاع اتمی از شعاع یونی استفاده کنیم.)

جواب: $3.8 \text{ Mg/m}^3 (= 3.8 \text{ g/cm}^3)$

۱۰-۲-۳ چگالی NaCl را حساب کنید.

۱۱-۲-۳ با مراجعه به شکل ۱-۱-۳ حساب کنید الف) فاصله بین مراکز نزدیکترین یونهای Cl^- چقدر است؟ ب) فاصله بین مرکز یون Na^+ تا نزدیکترین یون Cl^- بعدی چقدر است؟ ج) فاصله بین سطوح نزدیکترین یونهای Cl^- چقدر است؟ نزدیکترین یونهای Na^+ چگونه؟

جواب: الف) 0.39 nm ، ب) 0.48 nm ، ج) 0.53 nm ، 0.72 nm

۱۲-۲-۳ رابطه بین شعاعهای اتمی (یا یونی) و ابعاد سلول واحد را برای مکعب مرکز دار و مکعب با وجوه مرکز دار در جدولی ذکر کنید.

fcc NaCl	فقر bcc	فقر fcc
$a = 4R/\sqrt{3}$ ضلع سلول واحد		
قطر وجوه جانبی		
قطر مکعب		

۱۳-۲-۳ الف) در هر mm^3 استروسیم جامد چند اتم وجود دارد؟ ب) ضریب فشردگی اتمی آن چقدر است؟ ج) این ماده مکعبی است. شبکه فضایی آن چیست؟ (عدد اتمی = ۳۸؛ جرم اتمی = 87.62 amu ؛ شعاع اتمی = 0.215 nm ؛ شعاع یونی = 0.127 nm ؛ چگالی = 0.26 Mg/m^3)

جواب: الف) $1.78 \times 10^{19} / \text{mm}^3$ ، ب) 0.74

۳-۲-۱۴ الف) در هر mm^3 تانتال جامد چند اتم وجود دارد؟ (ب) ضریب فشردگی اتمی آن چقدر است؟ (ج) این ماده مکعبی است، شبکه فضایی آن چیست؟ (عدد اتمی = ۷۳؛ جرم اتمی = 180.95 amu ؛ شعاع اتمی = 0.1429 nm ؛ شعاع یونی = 0.068 nm ؛ چگالی = 16.6 Mg/m^3 .)

۳-۳-۱۸ ازداده‌های پیوست (ب) برای کبالت (hcp)، حجم سلول واحد (شکل ۳-۳-۲) را محاسبه کنید.

جواب: 0.066 nm^3

۳-۳-۲۰ آسیمیم با شعاع متوسط 0.137 nm ، hcp است. حجم سلول واحد آن را محاسبه کنید.

۳-۳-۲۳ جرم اتمی زیرکونیم 91.22 amu است، و شعاع متوسط اتمی این فلز hcp، 0.16 nm است. الف) حجم مربوط به هر اتم (کره + فضای بین اتمی) چقدر است؟ (ب) از جواب قسمت الف) چگالی را محاسبه کنید.

جواب: الف) $10^{-30} \times 23.2 \text{ m}^3$ (یا 0.0232 nm^3)

ب) $6.5 \text{ Mg/m}^3 (= 6.5 \text{ g/cm}^3)$

۳-۳-۴۰ ساختار روی hcp است. ارتفاع سلول واحد آن 0.494 nm است. مراکز اتمها در واحد شبکه‌ای به اندازه 0.2665 nm از هم فاصله دارند. الف) تعداد اتمهای موجود در سلول واحد منشور شش‌بر چقدر است؟ (برای آن دلیلی ذکر کنید.) (ب) حجم سلول واحد منشور شش‌بر چقدر است؟ (ج) چگالی محاسبه شده از چگالی واقعی 7.135 Mg/m^3 ، بزرگتر است یا کوچکتر؟

۳-۳-۵۰ با استفاده از داده‌های مسئله ۳-۳-۴۰ الف) نسبت c/a روی چقدر است؟ □ (ب) دفاصله از فواصل بین اتمی اتمهای مجاور را محاسبه کنید.

جواب: الف) ۱.۸۵ (ب) 0.2665 nm ، 0.291 nm

۳-۳-۶۰ منیزیم hcp است و اتمهایی تقریباً کروی به شعاع 0.161 nm دارد. نسبت c/a آن ۱.۶۲ است. الف) حجم سلول واحد را از این داده‌ها به دست آورید. (ب) جواب خود را با استفاده از آن در محاسبه چگالی منیزیم امتحان کنید.

۳-۴-۱۰ ثابت شبکه الماس، a ، شکل ۳-۲-۲ (ب) برابر 0.357 nm است. اگر به گرافیت ($\rho = 2.25 \text{ Mg/m}^3$ یا 2.25 g/cm^3) تبدیل شود، چند درصد تغییر حجم خواهد داشت؟

جواب: $56\% \text{ انقباض}$

۳-۴-۲ حجم سلول واحد آهن bcc در 912°C برابر 0.2467 nm^3 است. حجم سلول واحد آهن fcc در همان دما 0.2486 nm^3 است، درصد تغییر چگالی پس از تبدیل آن از bcc به fcc چقدر است؟

۳-۴-۳ تیتانیم در دمای بالا به صورت bcc است. هنگام تبدیل این ساختار به hcp در حین سرد شدن، شعاع آن ۲٪ افزایش می‌یابد. درصد تغییر حجم آن چقدر است؟ (یادآوری می‌شود که ضریب فشردگی اتمی نیز تغییر خواهد کرد.)

جواب: $(-0.81\%) (= -0.81\%)$

۴-۴-۳ قلع فلزی دارای ساختاری راست‌وجهی با $a = 0.357 \text{ nm}$ و $c = 0.3175 \text{ nm}$ است که در هر سلول واحد، چهار اتم دارد. صورت دیگر قلع (خاکستری) ساختار مکعبی الماس را دارد. [شکل ۲-۲-۴ (ب)] و $a = 0.357 \text{ nm}$ است. تغییر حجم قلع پس از تبدیل از خاکستری به فلزی چقدر است؟

۵-۴-۳ لایه‌های کربن در گرافیت (شکل ۲-۲-۶) 0.3348 nm از یکدیگر فاصله دارند. کوتاهترین فاصله بین مراکز اتمهای کربن 0.142 nm است. الف) چگالی گرافیت از چگالی الماس بیشتر است یا کمتر [شکل ۲-۲-۴ (ب)]؟ ب) چند درصد؟ ($a = 0.357 \text{ nm}$) (دانه‌بازی: تصویر روبه‌روی يك لایه از گرافیت را بکشید و يك واحد سطح از آن را در نظر بگیرید.)

جواب: الف) $(2.25 \text{ g/cm}^3 \text{ یا } 2.25 \text{ Mg/m}^3)$ ب) ۴۲٪ الماس

۳-۵-۱ با مراجعه به شکل ۳-۲-۱ می‌توانیم ساختار يك فلز bcc را تنها با دو مکان معین کنیم. این دو مکان کدام‌اند؟

جواب: ۰، ۰، ۰ و $1/2, 1/2, 1/2$. (اتمهای باقیمانده نقشی در انتقال ندارند)

۳-۵-۲ با مراجعه به شکل ۳-۲-۳ می‌توانیم ساختار يك فلز fcc را با چهار مکان معین کنیم. این مکانها کدام‌اند؟

۳-۵-۳ مس fcc است و ثابت شبکه آن 0.357 nm است، فاصله بین مکانهای ۰، ۰، ۰ و $1/2, 1/2, 1/2$ چقدر است؟

جواب: 0.2467 nm

۴-۵-۳ MgO همان ساختار NaCl را دارد (شکل ۳-۱-۱). ثابت شبکه آن 0.357 nm است. فاصله یون Mg^{2+} در $0, 0, 0$ و $1/2, 1/2, 1/2$ (الف) نزدیکترین همسایه Mg^{2+} آن؟ و ب) دومین همسایه Mg^{2+} نزدیک به آن چقدر است؟

۵-۵-۳ اگر اتم مسی در مبدأ سلول واحد fcc و حفرة بين اتمی کو چکی در $1/4, 1/4, 1/4$ وجود داشته باشد، سایر حفرة های معادل کجا یند؟

جواب: $3/4, 3/4, 3/4$ ، $1/4, 3/4, 3/4$ ، $3/4, 1/4, 3/4$ ، $3/4, 3/4, 1/4$ در صورتی که $1/4, 1/4, 1/4$ را نیز به حساب آوریم کلا چهار مکان در هر سلول واحد.

۵-۵-۳ مسئله ۵-۵-۳ را برای $3/4, 3/4, 3/4$ به جای $1/4, 1/4, 1/4$ تکرار کنید.

۵-۵-۳ هراتم در آهن bcc هشت همسایه نزدیک دارد. الف) تعداد دومین اتمهای نزدیک به آن چند تا است؟ ب) اگر a_{bcc} برای آهن 286 nm باشد، فاصله آن تا دومین اتمهای نزدیک به آن چقدر است؟

جواب: الف) ۶ ب) 286 nm

۵-۵-۳ با مراجعه به مسئله ۵-۵-۳ و شکل ۳-۲-۳ دیده می شود که مکانهای $1/4, 1/4, 1/4$ و $3/4, 3/4, 3/4$ هر دو بین چهار همسایه مجاور قرار دارند. آیا این مکانها معادل اند؟ به عبارت دیگر، چرا $3/4, 3/4, 3/4$ بین جوابهای مسئله ۵-۵-۳ نبود؟

۵-۵-۳ ساختار برنج β' طبق شکل ۴-۵-۳ مکعبی ساده است. اگر شعاعهای Cu و Zn به ترتیب 13 nm و 14 nm باشند، چگالی آن را تخمین بزنید.

جواب: $7.1 \text{ Mg/m}^3 (= 7.1 \text{ g/cm}^3)$

۵-۵-۳ ۱۰ نمای دوبعدی (از بالا به پایین نگاه کنید) اتمهای لایه پایینی شکل ۳-۳-۲ را بکشید. به جای هراتم در لایه وسط، نقطه ای قرار دهید. به جای هراتم در لایه بالایی، روی تصویر افقی \times قرار دهید. آیا نقطه ها و \times ها در بلور مکانهای معادل را اشغال می کنند؟

۵-۵-۳ ۱۱ با مراجعه به مسئله ۵-۵-۳، مقادیر a_1, a_2, c و مکانهای سلول واحد برای اتم جلویی در لایه وسط چقدر است؟

جواب: $a_1 = 2/3, a_2 = 1/3, c = 1/2$

۵-۵-۳ ۱۲ تصویر دوبعدی افقی صفحه (۱۱۱) بلور fcc را بکشید. (در جهت [۱۱۱] به طرف پایین نگاه کنید). به جای هراتمی که روی صفحه (۱۱۱) قرار دارد نقطه ای قرار دهید. به جای هراتم موجود در لایه دوم در تصویر افقی \times قرار دهید. آیا نقطه ها و \times ها در بلور مکانهای معادل را اشغال می کنند؟ جواب خود را با جواب مسئله ۵-۵-۳ مقایسه کنید.

۵-۵-۳ ۱۶ الف) خطی در جهت [۱۲۲] از مبدأ می گذرد. درجه نقطه ای سلول واحد مرجع را ترک می کند؟ ب) جهت [۱۲۲] دیگری سلول واحد را در $1, 1, 1$ ترک می کند. این خط

از کجا وارد سلول واحد مرجع می شود؟

جواب: الف) $1/2, 1/2, 0$ ب) $1/2, 0, 0$

۳-۶-۲ خطی در جهت [۱۱۱] از مکان $1/2, 1/2, 0$ می گذرد. دو مکان دیگر را در طول این مسیر معین کنید.

۳-۶-۳ خطی از نقطه $1/2, 1/2, 0$ به مرکز سلول واحد مجاور با شاخصهای $1/2, 1/2, 3/2$ رسم کنید. خط حاصل چه جهتی دارد؟

جواب: [۰۲۱]

۳-۶-۴ در سلول واحد راست وجهی خطی از مکان $1/2, 0, 0$ به $1/8, 1/4, 3/4$ متصل شده است. شاخص این جهت چیست؟

۳-۶-۵ الف) در بلور مکعبی، تانژانت زاویه بین [۱۱۰] و جهت [۱۱۱] چقدر است؟
ب) تانژانت زاویه بین جهت [۰۰۱] و جهت [۱۱۲] چقدر است؟

جواب: الف) $a/(a\sqrt{2}) = 0.71$ ب) $a/(a\sqrt{2}) = 0.71$

۳-۶-۶ الف) در بلور مکعبی، $\cos [113]$ چقدر است؟
ب) $\sin [001]$ چقدر است؟

۳-۶-۷ زاویه بین [۱۱۱] و [۱۱۱] در بلور مکعبی چقدر است؟ (دانه‌نمایی: [۱۰۱] این زاویه را نصف می کند.)

جواب: 70.5°

۳-۶-۸ الف) زاویه بین [۱۰۱] و [۱۰۱] در بلور مکعبی چقدر است؟ ب) در بلور راست وجهی که در آن $c/a = 0.85$ است چطور؟

۳-۶-۹ چگالی خطی اتم‌ها در (الف) جهت (۱۰۰) بلور مس (fcc) $a = 0.361 \text{ nm}$ چقدر است؟ ب) برای جهت (۱۰۰) بلور آهن (bcc) $a = 0.286 \text{ nm}$ چطور؟

جواب: الف) $2.77 \times 10^6 \text{ Cu/mm}$ ب) $3.50 \times 10^6 \text{ Fe/mm}$

۳-۶-۱۰ چگالی خطی اتم‌ها در (الف) جهت [۲۲۱] بلور مس چقدر است؟ برای جهت [۲۲۱] بلور آهن چطور؟ (برای ثابتهای شبکه به مسئله ۳-۶-۹ مراجعه کنید.)

۳-۶-۱۱ از محل $1/4, 1/4, 3/4$ به مرکز سلول واحد بعدی در عقب (جهت $-x$) خطی بکشید. الف) جهت $[uvw]$ بین این دو نقطه را معین کنید؟ ب) سلول واحد آن راست وجهی است با $a = 0.31 \text{ nm}$ و $c = 0.33 \text{ nm}$. فاصله بین دو نقطه در قسمت

(الف) چقدر است؟

جواب: (الف) $[311]$ (ب) 0.259 nm

۳-۶-۱۲ از محل $1/2, 0, 1/2$ در بلور آلومینیم به مرکز قاعده سلول واحد بعدی (جهت x) خطی بکشید. (الف) جهت آن چیست؟ \square (ب) چگالی خطی آنها در آن جهت چقدر است؟ (ج) روی شکلی، جهت موازی آن را که از محل $1, 0, 0$ می گذرد نشان دهید. در سلول واحد دوم محل دیگر را نشان دهید که این خط موازی از آنها می گذرد.

\square ۳-۶-۱۳ قلع فلزی bct است که در آن $a = 0.582 \text{ nm}$ و $c = 0.3175 \text{ nm}$ است. (الف) چگالی خطی محلهای معادل در جهت $\langle 101 \rangle$ چقدر است؟ (ب) درجهت $\langle 110 \rangle$ چطور؟ (ج) درجهت $\langle 201 \rangle$ این چگالی چقدر است؟

جواب: (الف) $1.50 \times 10^6 / \text{mm}$ (ب) $1.21 \times 10^6 / \text{mm}$
(ج) $0.83 \times 10^6 / \text{mm}$

\square ۳-۶-۱۴ با توجه به داده های مسئله ۳-۶-۱۳، در هر سلول واحد قلع فلزی چهار اتم وجود دارد که در محلهای $0, 0, 0$ و $1/2, 0, 1/2$ و با انتقال $\pm a/2, \pm a/2, \pm c/2$ قرار دارند. (الف) شکلی از سلول واحد قلع فلزی رسم کنید که محل تمام اتمها را نشان دهد؛ (ب) مرکز نزدیکترین اتمهای قلع چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟

\square ۳-۶-۱۵ با توجه به مسئله ۳-۶-۱۳ و ۳-۶-۱۴، چگالی خطی اتمهای قلع (الف) درجهت $\langle 110 \rangle$ ؛ و (ب) درجهت $\langle 201 \rangle$ چقدر است؟

جواب: (الف) $1.21 \times 10^6 / \text{mm}$ (ب) $1.66 \times 10^6 / \text{mm}$

۳-۶-۱۶ (الف) درجهات هم خانواده $\langle 100 \rangle$ بلور مکعبی چند جهت وجود دارد؛ (ب) درجهات هم خانواده $\langle 110 \rangle$ چطور؟ درجهات هم خانواده $\langle 111 \rangle$ چند جهت وجود دارد؟
۳-۶-۱۷ (الف) درجهات هم خانواده $\langle 210 \rangle$ بلور مکعبی چند جهت وجود دارد؛ (ب) در بلور راست وجهی چطور؟

جواب: (الف) ۱۲ (ب) ۴

۳-۶-۱۸ صفحه ای محورهای بلور را در $a = 0.5$ و $b = 1$ قطع می کند و موازی محور z است. شاخصهای میلر آن چیست؟

جواب: (210)

۳-۶-۱۹ صفحه ای محورها را در $a = 2$ و $b = 1$ قطع می کند. شاخصهای میلر آن چیست؟
۳-۶-۲۰ شاخصهای صفحه ای را تعیین کنید که محلهای برخورد آن $a = -2$ ، $b = 2/3$

و $c = 3/2$ است.

جواب: (۳۹۴)

۳-۷-۴ شاخصهای صفحه‌ای را تعیین کنید که محلهای برخورد آن $a = 1/2$ ، $b = -3/2$ و $c = 1/3$ است.

۳-۷-۵ صفحه (۲۱۱) از محل ۰، ۲، ۰ می‌گذرد محلهای برخورد آن را با محورهای مختصات تعیین کنید.

جواب: $a = 1$ ، $b = 2$ ، $c = 2$

۳-۷-۶ صفحه (۱۲۰) که از محل ۱، ۱، ۱ می‌گذرد در چه نقاطی محورها را قطع می‌کند؟
۳-۷-۷ محلهای برخورد یک صفحه (۱۱۱) را که از مرکز سلول واحد با شاخص $1/2$ ، $1/2$ ، $1/2$ می‌گذرد تعیین کنید.

جواب: $a = 1.5$ ، $b = 1.5$ ، $c = 1.5$

۳-۷-۸ یک صفحه (۳۳۱) شامل مکانهای ۰، ۰، ۰ و ۱، ۰، ۰ است. مکان بلوری دیگری روی این صفحه چیست؟

۳-۷-۹ صفحه‌ای شامل مکانهای ۰، ۰، ۰ و ۰، ۱، ۱/۲، ۱/۲، ۱ است، شاخصهای میلر آن چیست؟

جواب: (۱۰۱)، یا (۱۰۱)

۳-۷-۱۰ صفحه‌ای شامل مکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۱، ۱/۲، ۱/۲، ۰، ۰، ۰ و ۰، ۱/۲، ۱/۲، ۰ در سلول واحد است. شاخصهای میلر آن چیست؟

۳-۷-۱۱ الف) در هر mm^2 از صفحه (۱۰۰) نقره چند اتم وجود دارد؟ ب) در صفحه (۱۱۰) چطور؟ ج) تعداد اتمها در صفحه (۱۱۱) چقدر است؟

جواب: الف) $12 \times 10^{12} / \text{mm}^2$ ب) $8.5 \times 10^{12} / \text{mm}^2$

ج) $14 \times 10^{12} / \text{mm}^2$

۳-۷-۱۲ الف) در هر mm^2 از صفحه (۱۰۰) نیکل چند اتم وجود دارد؟ ب) در صفحه (۱۱۰) چطور؟ ج) تعداد اتمها در صفحه (۱۱۱) چقدر است؟

۳-۷-۱۳ الف) در هر mm^2 از صفحه (۱۱۱) آهن چند اتم وجود دارد؟ ب) در صفحه (۲۱۰) نقره چطور؟

جواب: الف) $7 \times 10^{12} / \text{mm}^2$ ب) $5.4 \times 10^{12} / \text{mm}^2$

۳-۷-۱۴ الف) سلول واحد نقره (fcc) را بکشید و صفحه (۰۱۲) را سایه بزنید؛ ب) چگالی صفحه‌ای اتمها چقدر است.

۳-۷-۱۵ الف) سلول واحد کرم (bcc) را بکشید و صفحه (۱۰۲) را سایه بزنید؛ ب) چگالی صفحه‌ای اتمها چقدر است؟

جواب: $5.4 \times 10^{12} / \text{mm}^2$

□ ۳-۷-۱۶ الف) در هر mm^2 از صفحه (۱۱۰) الماس چند اتم وجود دارد؟ ب) در صفحه (۱۱۱) چطور؟ (شکل ۲-۲-۴ (ب) را ببینید؛ $a = 0.357 \text{ nm}$)

□ ۳-۷-۱۷ الف) فصل مشترک بین صفحات (۱۱۰) و (۱۱۱) در بلور مکعبی چیست؟ ب) در بلور راست‌وجهی چطور؟

جواب: الف) [۱۱۲] ب) [۱۱۲]

□ ۳-۷-۱۸ الف) فصل مشترک صفحات (۱۱۲) و (۰۱۰) چیست؟ ب) صفحات (۱۱۲) و (۱۱۰) چطور؟

□ ۳-۷-۱۹ شاخصای $\{hkl\}$ که محورها را در $a_1 = 1$ ؛ $a_2 = 1$ و $c = 0.5$ قطع می‌کنند معین کنید.

جواب: (۱۱۲)

□ ۳-۷-۲۰ کدامیک از اتمهای کشیده‌شده در شکل ۳-۳-۲ (الف) در آن صفحه (۱۰۱۱) که محور عمودی را در $c = 1$ قطع می‌کند قرار دارد؟ (دقت کنید، احتمال اشتباه در پاسخ این سؤال بسیار است.)

□ ۳-۷-۲۱ الف) صفحاتی را که به خانواده {۱۰۰} بلور راست‌وجهی تعلق دارند نام ببرید؛ ب) صفحات خانواده {۰۰۱} را هم نام ببرید.

جواب: الف) (۱۰۰)، (۰۱۰)، (۰۰۱)، (۱۰۰)، (۰۱۰)، (۰۰۱) ب) (۰۰۱)، (۰۰۱)

۳-۷-۲۲ دوازده صفحه متعلق به خانواده {۱۱۰} در بلور مکعبی را نام ببرید.

۳-۷-۲۳ چه جهاتی از {۱۱۰} در صفحه (۱۱۱) مس قرار دارند؟ ب) در صفحه (۱۱۱) چطور؟

جواب: الف) [۱۱۰]، [۱۰۱]، [۰۱۱] و عکس آنها ب) [۱۱۰]، [۱۰۱]، [۰۱۱] و عکس آنها.

۳-۷-۲۴ الف) چه جهاتی از {۱۱۱} در صفحه (۱۱۰) آهن قرار دارند؟ در صفحه

(۱۱۵) چطور؟

□ ۱-۸-۳ ثابت شبکه برای سلول واحد آلومینیم برابر است با 0.4049 nm ، مطلوب است تعیین الف) d_{220} ب) d_{111} ج) d_{200}

جواب: الف) 0.1431 nm ب) 0.2337 nm ج) 0.2024 nm

□ ۲-۸-۳ ساختار نیکل، مکعب با وجوه مرکزدار با شعاع اتمی 0.1246 nm است تعیین الف) d_{200} ب) d_{220} ج) d_{111}

□ ۳-۸-۳ فاصله بین صفحات (۱۱۵) در فلز مکعبی مرکزدار 0.203 nm است. الف) اندازه سلول واحد چقدر است؟ ب) شعاع اتمی را تعیین کنید ج) این فلز، چه فلزی می تواند باشد؟

جواب: الف) 0.287 nm ب) 0.124 nm ج) آهن bcc یا Cr (نه Ni)

□ ۴-۸-۳ فضای بین صفحه‌ای d_{111} در فلزی fcc برابر 0.235 nm است. الف) اندازه سلول واحد آن را تعیین کنید؟ ب) شعاع اتمی چقدر است؟ ج) این فلز چه فلزی می تواند باشد؟

□ ۵-۸-۳ اشعه ایکسی با طول موج 0.558 nm برای محاسبه d_{200} نیکل به کار رفته است. زاویه تفرق 2θ برابر 19° است. اندازه سلول واحد آن چقدر است؟ ($n=1$)

جواب: 0.35 nm

□ ۶-۸-۳ برای اندازه گیری طول موج اشعه ایکس از بلور سدیم کلرید استفاده می شود. زاویه تفرق 2θ ، برای فاصله d_{111} یونهای کلر برابر 30° است. طول موج چقدر است؟ (ثابت شبکه ای برابر 0.356 nm است.)

□ ۷-۸-۳ اولین خط (کمترین 2θ) شکل ۳-۸-۳ ب) برای فاصله d_{110} در تنگستن است. الف) زاویه تفرق 2θ را با شکل تعیین کنید؟ ب) شعاع اتم تنگستن 0.1367 nm است. چه طول موجی به کار رفته است؟ ج) دومین خط تفرق برای چه فاصله d_{hkl} است؟ ($n=1$)

جواب: الف) 41° ب) 0.156 nm ج) d_{200} و $h^2 + k^2 + l^2 = 4$

□ ۸-۸-۳ اولین خط (کمترین 2θ) شکل ۳-۸-۳ الف) برای فاصله d_{111} در مس است. الف) مقدار 2θ در آن چقدر است؟ ب) شعاع اتم مس 0.1278 nm است. طول موج اشعه ایکس را حساب کنید. ج) دومین خط تفرق برای چه فاصله d_{hkl} ای است؟

بی‌نظمی اتمی در جامدات

چشم‌انداز فصل

طبیعت کامل نیست: ذاتاً نوعی بی‌نظمی در آن است. بنابراین ساختارهایی که در فصل سوم تشریح شدند، استثناهایی دارند که اغلب جزئی‌اند: از هر 10^3 اتم شاید یکی در جای خودش نباشد. این استثناءها گرچه جزئی‌اند اما اهمیت دارند و رفتار نیم‌رساناها، انعطاف‌پذیری فلزات، و استحکام بخشیدن به آلیاژها، ناشی از آنهاست. همین نقصها هستند که رنگ براقیت کبود را موجب می‌شوند. همچنین حرکت اتمها را در حین عملیات گرمایی ممکن می‌سازند و در نتیجه ساختارهای جدید و خواص بهتری به وجود می‌آید.

در این فصل نخست ناخالصیها، سپس نقصهای خطی-بلوری بررسی می‌شوند. بعضی از جامدات آنقدر بی‌نظم‌اند که آنها را بلوری به حساب نمی‌آوریم. در پایان برادقشات اتمی و حرکتهای درون جامدات نیز نظر خواهیم کرد.

هدف از مطالعه

۱. کاربرد اطلاعاتی که در شیعی در مورد محلولهای مایع کسب کرده اید، برای مفاهیم جدید در مورد محلولهای جامد. (این شامل محلولهای جامد جانشینی و بین نشینی و ناستوکیومتری می شود.)
۲. تعریف عیوب بلوری به صورت صفر بعدی (تهیجای و بین نشینی)، یک بعدی (ناجایی)، یا دوبعدی (مرز و سطح) و تشریح انرژی لازم بر حسب فواصل بین اتمی.
۳. توانایی شاخص گذاری کمی سطح مرز دانه در جامد (و آشناسدن با شاخص بین المللی «اندازه دانه ASTM»).
۴. فرق گذاشتن بین تغییراتی که با (الف) انجماد مواد بلوری، و (ب) انجماد مواد بی شکل (غیر بلوری) همراهند.
۵. دانستن عواملی که بر نفوذ پذیری حرکت اتمها اثر می گذارد. این عوامل در فرایندهای ساخت و عملیات گرمایی اهمیت بسیار دارند.

۱-۴ ناخالصیهای درون جامدات

آنچه که ناب است مطلوب است؛ بنابراین پشم خالص و شکر تصفیه شده را معمولاً ترجیح می دهیم و طلای ۲۴ عیار را می پسندیم. اگرچه این ایدئالها ممکن است بسیار خوب باشند، در مواردی به خاطر قیمت، قابلیت دسترسی، یا خواص وجود ناخالصیها در آنها مناسب است. مثلاً نفوذ استرلینگ، شامل ۷۵٪ مس و تنها ۲۵٪ نقره است (مثال ۱-۲-۱). این ماده که ارزش زیادی دارد، می تواند به خوبی تا بیش از ۹۹٪ خلوص تصفیه شود. در آن صورت قیمت آن بیشتر بود. ولی کیفیت آن پایین می آمد. وجود ۷۵٪ مس بدون اینکه در ظاهر جسم تغییری دهد، نقره را محکمتر، سخت تر، و در نتیجه با دوامتر می سازد، در عین حال قیمت آن نیز کمتر می شود!

البته باید خواصی را که با طراحیمان مناسب دارند مورد توجه قرار دهیم. با افزایش روی به مس برنج تولید می شود که آن هم از مس خالص ارزانتر است. برنج سخت تر، قویتر و انعطاف پذیرتر از مس است. در عوض رسانندگی الکتریکی برنج از مس، کمتر است، بنابراین برای سیم کشی الکتریکی و مصارف مشابهی که در آن رسانندگی اهمیت دارد، از مس خالص که گرانتر است استفاده می کنیم.

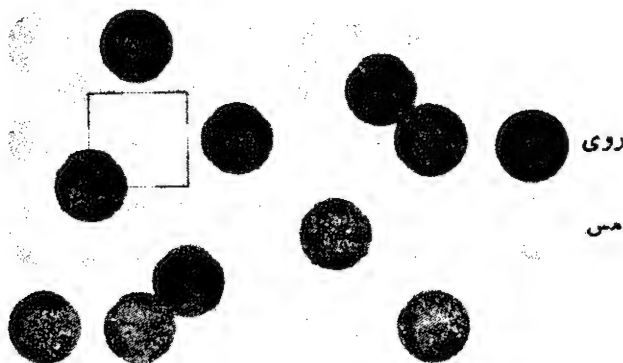
آلیاژها آمیخته ای از دو یا چند فلزند که به صورت یک ماده درمی آیند. این آمیخته ها می توانند مخلوطی از دو نوع ساختار بلوری باشند (مانند آهن bcc و Fe_3C در * همان طور که در پانوش مثال ۱-۲-۱ گفته شد، در مورد مایعات و جامدات معمولاً درصد وزنی (w/o) به کار می رود، مگر اینکه مخصوصاً طور دیگری بیان شود.

تیر فولادی پل). از طرف دیگر آلیاژها ممکن است شامل محلولهای جامد باشند، که مثال آن در بخش بعد در مورد برنج خواهد آمد. اگر چه واژه آلیاژ را معمولاً در مورد محصولات سرامیکی به کار نمی‌برند، ولی ترکیبات مختلف دو یا چند جزء اکسیدی می‌توانند به طور سودمندی به هم پیوندند و محصولات سرامیکی را به وجود آورند (مانند عایق شمع اتومبیل در شکل ۲-۷-۳). به همین ترتیب تلفن پلاستیکی شکل ۲-۷-۲ شامل آمیخته‌ای از چند نوع مولکول است.

۲-۴ محلولهای جامد در فلزات

اگر اتمهای حل‌شونده و حلال اندازه‌های مشابه و ساختارهای الکترونی نظیر هم داشته باشند، محلولهای جامد به آسانی تشکیل می‌شوند. مثلاً شعاع اتمهای تشکیل دهنده برنج یعنی مس و روی به ترتیب 0.1278 nm و 0.139 nm است. هر دو 28 الکترون زیر ظرفیتی دارند هر کدام ساختار بلوری خود را با عدد کوئوردیناسیون 12 تشکیل می‌دهد. بنابراین وقتی روی به مس افزوده شود، در شبکه fcc مس به راحتی به جای آن قرار می‌گیرد تا جایی که جانشین حداکثر 40% اتمهای مس می‌شود. در این محلول جامد مس و روی، توزیع روی کاملاً تصادفی است (شکل ۴-۲-۱ را ببینید).

محلولهای جامد جانشینی. محلول جامدی که در بالا تشریح شد محلول جامد جانشینی نام دارد، زیرا اتمهای روی در ساختار بلوری مس جانشین اتمهای آن می‌شوند. این نوع محلول جامد در بین سیستمهای فلزی گوناگون کاملاً متداول است. مثال دیگر آن محلول مس و نیکل در تشکیل کاپرونیکل است که در آن اتمهای نیکل می‌تواند جایگزین هر کسری از اتمهای ساختار اولیه مس شود. محلولهای جامد مس-نیکل می‌توانند در گستره‌ای بین



شکل ۴-۲-۱ جانشینی تصادفی در محلولهای جامد (روی در مس یعنی برنج). الگوی بلوری تغییر نکرده است.

۱۰۰٪ مس بدون نیکل، تا تقریباً ۱۰۰٪ نیکل و عملاً بدون مس تغییر یابند. تمام آلیاژهای مس-نیکل مکعبی با وجوه مرکزدار هستند.

از طرف دیگر، قلع تا حد معینی می‌تواند جانشین مس شود و بدون تغییر دادن ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار آن، مفرغ تشکیل دهد. اگر مقدار قلع از بیشینه حلالیت آن در حالت جامد بیشتر باشد باید فاز دیگری تشکیل دهد. در فصل نهم حد حلالیت با جزئیات بیشتری بررسی خواهد شد.

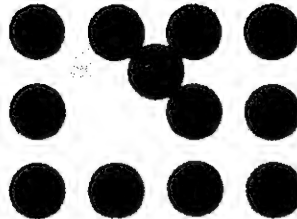
اگر قرار باشد جایگزینی وسیعی در محلولهای جامد نوع جانشینی صورت گیرد، لازم است اتمها تقریباً هم اندازه باشند. نیکل و مس گستره کاملی از حلالیت دارند زیرا هر دو ساختار مجزای آنها fcc و شعاع اتمی آنها به ترتیب 0.1246 nm و 0.1278 nm است. اگر تفاوت اندازه زیادتر شود، اتمهای کمتری می‌توانند جانشین شوند. تنها ۲۰٪ اتمهای مس می‌توانند با اتمهای آلومینیم جایگزین شوند، زیرا در مقایسه با شعاع 0.1278 nm اتم مس، آلومینیم شعاعی برابر 0.1431 nm دارد. اگر اختلاف شعاع در نوع اتم بیش از ۱۵٪ باشد، حلالیت در حالت جامد به ندرت به‌طور وسیعی اتفاق می‌افتد. اگر دو جزء مختلف باشند یا ظرفیت متفاوت داشته باشند، حلالیت محدودتر است.

عامل محدودکننده، وزن اتمهای جانشین شده نیست بلکه تعداد اتمهای جانشین شده است. با این حال مهندسان معمولاً ترکیب را به‌صورت درصد وزنی بیان می‌کنند. بنابراین لازم است بدانیم که چگونه درصد وزنی به درصد اتمی تبدیل می‌شود، و برعکس (مثال ۱-۱-۲ را ببینید).

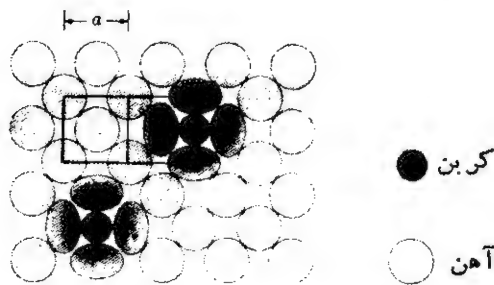
□ **محلولهای جامد منظم.** شکل ۱-۲-۴ جانشینی تصادفی اتمی به جای اتم دیگر را در ساختار بلوری نشان می‌دهد. در چنین محلولی، احتمال اینکه هر عنصر جای اتم خاصی را در بلور اشغال کند برابر درصد اتمی آن عنصر در آلیاژ است. در این حالت هیچ نظمی در جانشینی دو عنصر وجود ندارد.

با این حال شاید بتوان نظمی در آرایش ویژهٔ دو نوع اتم یافت. شکل ۲-۲-۴ ساختار منظمی را نشان می‌دهد که در آن بیشتر اتمهای تیره با اتمهای روشن احاطه شده‌اند. چنین نظمی در دماهای بالاتر کمتر دیده می‌شود زیرا تحرک گرمایی زیاد، آرایش منظم را از میان می‌برد.

محلولهای جامد بین‌نشینی. شکل ۳-۲-۴ نوع دیگری از محلول جامد را نشان می‌دهد، هر اتم کوچک می‌تواند در فضای خالی بین اتمهای بزرگتر جای گیرد. کربن در آهن مثالی از این نوع است. در دماهای زیر 912°C (1673°F)، آهن خالص دارای ساختار مکعبی مرکزدار است؛ بالاتر از 912°C (1673°F)، در گستره‌ای از دما، آهن ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار دارد. در شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار، در مرکز سلول واحد فضای خالی



شکل ۲-۲-۴ محلول جامد جانشینی منظم. اکثریت (ولی نه تمامی) اتمها در میان اتمهای نامشابه با خودشان قرار گرفته اند، اگر این نظم کامل باشد، ماده مرکب شکل می گیرد (بخش ۳-۴).



شکل ۲-۲-۴ محلول جامد بین نشینی، (کربن در آهن fcc).

یا «حفره» نسبتاً بزرگی وجود دارد. کربن، که اتم بسیار کوچکی است، می تواند به درون این حفره برود و محلول جامد آهن و کربن را تولید کند. در دماهای پایینتر که آهن ساختار مکعبی مرکزدار دارد، فضاهای خالی بین اتمهای آهن بسیار کوچکتر است. در نتیجه حلالیت کربن در آهن مکعبی مرکزدار بسیار محدود است.

مثال ۲-۲-۱ مفرغ آلیاژ محلول جامدی از مس و قلع است که در آن کم و بیش حدود ۳٪ اتمهای مس با اتمهای قلع جایگزین شده اند. ساختار سلول واحد مس، fcc باقی مانده است، ولی اندکی منبسط شده، زیرا شعاع اتم قلع تقریباً 151 nm (۱۵۱ پیکومتر) است. الف) درصد وزنی مفرغی که $8/3$ قلع دارد چقدر است؟ ب) اگر فرض کنیم ثابت شبکه به طور خطی با درصد اتمی قلع افزایش یابد، چگالی این مفرغ چقدر است؟

حل: ۲۵ سلول واحد fcc = ۱۰۰ اتم : مبنا

(الف)

$$97(63.54 \text{ amu}) = 6163 \text{ amu} = 0.945 \text{ (یا } 94.5 \text{ w/o)}$$

$$3(118.69 \text{ amu}) = 356 \text{ amu} = 0.054 \text{ (یا } 5.4 \text{ w/o)}$$

$$6519$$

(ب)

$$\text{شعاع متوسط} = 0.97(0.1278 \text{ nm}) + 0.03(0.151 \text{ nm}) = 0.1285 \text{ nm}$$

$$a = \frac{(4)(0.1285)}{\sqrt{2}} = 0.3634 \text{ nm}$$

$$\rho = \frac{6519 \text{ amu} / (0.602 \times 10^{24} \text{ amu/g})}{25(0.3634 \times 10^{-9} \text{ m})^3}$$

$$\blacktriangle \quad = 9.0 \text{ Mg/m}^3 (= 9.0 \text{ g/cm}^3)$$

مثال ۲-۲-۴ بیشینه حد حلالیت قلع در مفرغ در 586°C معادل ۱۵.۸ درصد وزنی است. درصد اتمی قلع چقدر است؟

$$\text{حل: } 100000 \text{ amu} = 15800 \text{ amu Sn} + 84200 \text{ amu Cu}$$

$$\text{Cu تعداد اتمهای} = \frac{84200}{63.54} = 1325, 909 \text{ a/o Cu}$$

$$\blacktriangle \quad \text{Sn تعداد اتمهای} = \frac{15800}{118.69} = \frac{133, 911 \text{ a/o Sn}}{1458}$$

مثال ۳-۲-۴ در 1000°C ، محلول جامد کربن در آهن fcc می تواند حاوی ۱.۷ w/o کربن باشد (شکل ۳-۲-۴). در هر ۱۰۰ سلول واحد چند اتم کربن موجود است؟

$$\text{حل: } 200 \text{ اتم آهن} = 100 \text{ سلول واحد: مینا}$$

$$(200 \text{ Fe})(55.85 \text{ amu/Fe}) = 22340 \text{ amu}$$

$$22340 \left(\frac{1.7}{98.3} \right) = 3863 \text{ amu C برای } 1.7\% \text{ C}$$

$$\frac{3863 \text{ amu}}{(120.1 \text{ amu/C}_{\text{اتم}})} = 32 \text{ اتم کربن}$$

توضیح. تقریباً در $1/3$ سلولهای واحد، اتم کربن در مکان $1/2, 1/2, 1/2$ قرار می گیرد. چون اتم کربن اندکی از حفره بزرگتر است، ممکن نیست که در تمام مکانهای معادل وجود داشته باشد.

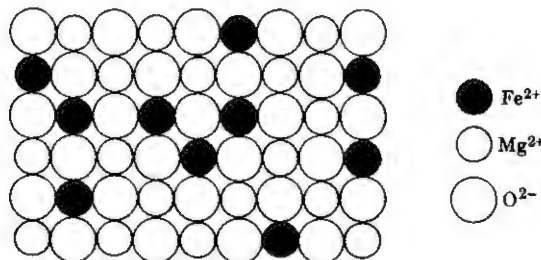
▲

□ ۳-۴ محلولهای جامد در مواد مرکب

محلولهای جامد جانشینی، در فازهای یونی نیز مانند فلزات می توانند وجود داشته باشند. در فازهای یونی، نیز مانند فلزات جامد، اندازه اتم یا یون مهم است. شکل ۳-۴-۱ مثال ساده ای از محلول جامد یونی را نشان می دهد. این ساختار متعلق به MgO است (شکل ۳-۴-۱) که در آن یونهای Mg^{2+} با یونهای Fe^{2+} جایگزین شده اند. از آنجا که شعاع دویون برابر $nm\ 0.066$ و $nm\ 0.074$ است، جانشینی کامل امکانپذیر است. از طرف دیگر یونهای Ca^{2+} نمی توانند به طریق مشابه جانشین یونهای Mg^{2+} شوند زیرا شعاع آنها $nm\ 0.099$ و نسبتاً بزرگ است.*

مسئله دیگری که وجود آن در محلولهای جامد سرامیکی ضروریت از محلولهای جامد فلزی است، این است که بارهای ظرفیتی یون جایگزین شده و یون جدید باید مساوی باشند. مثلاً قرار دادن Li^+ به جای Mg^{2+} در MgO ، اگر چه شعاع هر دوی آنها تقریباً برابر است، مشکل خواهد بود زیرا نقصان بار به وجود می آید. این جانشینی تنها در صورتی می تواند تحقق یابد که تغییرات متعادل کننده دیگری در بارها رخ دهد، (بخش ۸-۴ را ببینید).

مواد مرکب ناستوکیومتری. بسیاری از مواد مرکب دارای نسبتهای دقیقی از عناصرند (مانند H_2O ، CH_4 ، MgO ، Al_2O_3 ، Fe_3C ، که در این مورد مثالهای اندکی به شمار



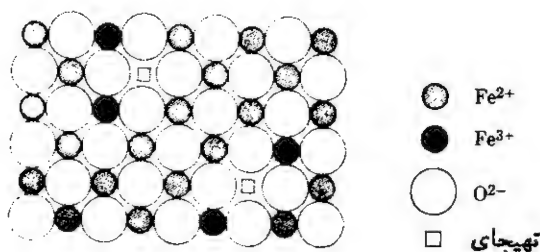
شکل ۳-۴-۱ محلول جامد جانشینی در ترکیب. در ساختار MgO ، Fe^{2+} جانشین Mg^{2+} شده است.

می‌روند). نسبت اتمها در اینها ثابت است؛ بنابراین استوکیومتری اند. بین اتمهای نامشابه پیوند تشکیل می‌شود. در نتیجه ساختار آن حتی از آنچه که در شکل ۲-۲-۴ دیدیم، کاملتر می‌شود.

دسته دیگری از مواد مرکب نسبتهای صحیح و مشخصی برای دو (یا چند) عنصر خود ندارند. در این حالت « Cu_2Al » به جای نسبت دقیق (۱/۳) ۳۳ درصد اتمی Al در حدود ۳۱ تا ۴۷ درصد اتمی Al (۱۶ تا ۲۵ درصد وزنی Al) دارد. همچنین در 1000°C « FeO » از ۵۱ تا ۵۳ درصد اتمی اکسیژن دارد، در حالی که باید دقیقاً ۵۰ درصد اتمی اکسیژن داشته باشد. این مواد مرکب را ناستوکیومتری می‌نامیم زیرا نسبت ثابتی از اتمها ندارند.

ترکیبات ناستوکیومتری همیشه شامل نوعی محلول جامدند. در مثال Cu_2Al که قبلاً شرح داده شد، اتمها تقریباً به قدر کافی هم اندازه و از نظر الکترونیکی قابل مقایسه اند، به طوری که در صورت وجود آلومینیم زیادتر، تعداد بیشتری از اتمهای مس با اتمهای آلومینیم جایگزین می‌شوند (بیشینه تا ۳۷ درصد اتمی Al). برعکس در حضور مس اضافی، با جانشین شدن تعداد کمی اتمهای مس به جای اتمهای آلومینیم در Cu_2Al ، نسبت اتمی Cu/Al به ۶۹/۳۱ می‌رسد.

ناستوکیومتری بودن Fe_{1-x}O علت متفاوتی دارد. یونهای آهن و اکسیژن آنقدر متفاوت اند که درصد جانشینی آنها قابل اندازه گیری نیست. با این حال ترکیبات آهن همیشه در کنار یونهای فرو (Fe^{2+}) تعدادی یون فریک (Fe^{3+}) نیز دارند. بنابراین برای ترازمندی بارها، همیشه باید بیشتر از ۵۰ درصد اتمی اکسیژن موجود باشد. در حقیقت هر دو یون Fe^{2+} به یک یون اضافی O^{2-} احتیاج دارد، یا برعکس هر جفت یون Fe^{3+} باید با یک تهیجای کاتیونی همراه باشد، (شکل ۲-۳-۴). این ساختار را ساختار معیوب می‌نامند، زیرا



شکل ۲-۳-۴ ساختار ناقص (Fe_{1-x}O) ایسن ساختار نظیر NaCl (شکل ۱-۱-۳) است. با این تفاوت که تعدادی تهیجای یون آهن در آن وجود دارد. از آنجا که کسری از یونهای آهن به جای Fe^{2+} ، یونهای Fe^{3+} اند، وجود تهیجایها برای ترازمندی بار لازم است، مقدار از ۵۴٫۵ تا ۱۶٫۵ پسته په‌دما و مقدار اکسیژن موجود، تغییر می‌کند.

درفشردگی آنها بی نظمیهای وجود دارد. در 1000°C اگر آهن به حد اشباع وجود داشته باشد، ترکیب آن $\text{Fe}_{0.96}\text{O}$ و اگر اکسیژن به حد اشباع وجود داشته باشد، ترکیب آن $\text{Fe}_{0.88}\text{O}$ است.

این ساختارهای ناقص در فصل بعد که درباره رسانندگی الکتریکی بحث می کنیم اهمیت خواهد داشت. همچنین بعداً در این فصل خواهیم دید که آنها یا یونها با وجود تهیجایها راحت تر می توانند در میان جامدات بلوری نفوذ کنند.

مثال ۳-۴-۱ اکسیدی از آهن (شکل ۳-۴-۲) ۵۲ درصد اتمی اکسیژن دارد و ثابت شبکه آن 0.429 nm است. الف) نسبت یونی $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ چقدر است؟ ب) چگالی این اکسید چقدر است؟ (این ساختار بجز در مورد تهیجایهای □، شبیه به NaCl است.)

$$\text{حل: } 4\text{O}^{2-} + 4\text{Fe} + 4\text{□} = 52\text{O}^{2-} + 48\text{Fe} + 4\text{□} \quad \text{الف)}$$

$$0 = (4+)(48-y) + (3+y)(4) + (2-y)(4) = 52(2-)$$

$$y = 8\text{Fe}^{2+} \quad 48 - y = 40\text{Fe}^{3+}$$

$$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} = 5$$

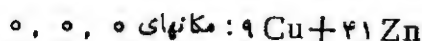
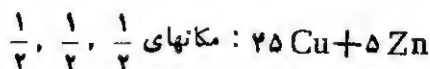
ب) با وجود ۴ آنیون در سلول واحد (مطابق شکل ۳-۴-۱)، ۱۳ سلول واحد داریم

$$\rho = \frac{[48(55.8) + 52(16)] \text{ amu} / 13 \text{ u.c.}}{(0.429 \times 10^{-9} \text{ m})^3 / \text{u.c.}}$$

$$\Delta \quad = 5.7 \text{ Mg/m}^3 (= 5.7 \text{ g/cm}^3)$$

□ مثال ۳-۴-۲ برنج β' اسماً ترکیب بین فلزی، CuZn ، با ساختار مکعبی ساده مطابق شکل ۳-۵-۴ است. آن را می توان محلول جامد منظم جزئی نیز نامید، مخصوصاً به این خاطر که در 450°C در گستره ۴۶ تا ۵۰ درصد اتمی روی، ناستوکیومتری است. فرض کنید که در آلیاژ ۴۶ درصد اتمی Zn و ۵۴ درصد اتمی Cu ، اتمهای مس مطابق شکل ۳-۵-۴، ۹۰٪ از مکانهای $1/2, 1/2, 1/2$ را اشغال کرده باشند. چه درصدی از مکانهای ۰، ۰، ۰ را اتمهای مس اشغال می کنند؟

حل: (و ۵۰ مکانهای $1/2, 1/2, 1/2$) مکانهای $0, 0, 0$ $50 = 50$ سلول واحد: مبنا



در نتیجه ۹ از ۵۰ یا ۱۸٪ از مکانهای $0, 0, 0$ به وسیله اتمهای مس اشغال شده است.

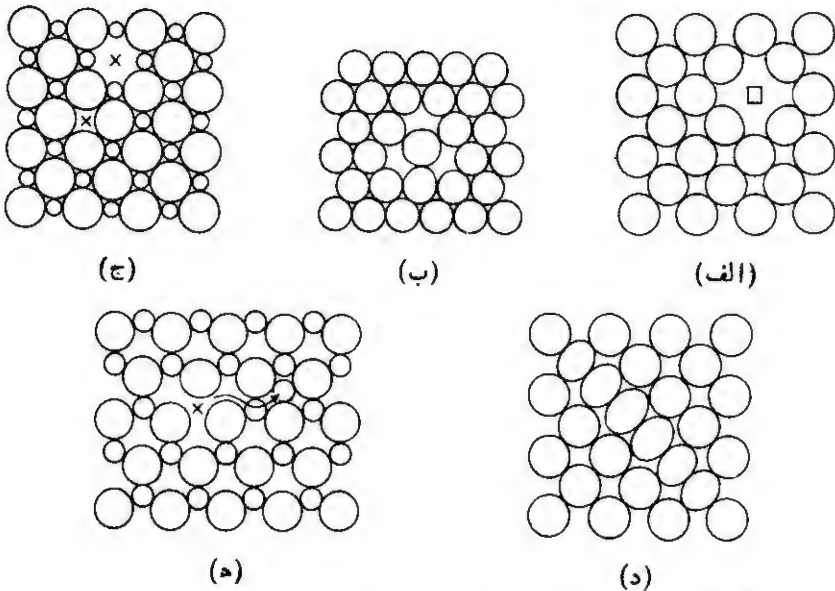
توضیح. در دماهای پایین تقریباً تمام همسایه‌های اتمهای روی را اتمهای مس تشکیل می‌دهند و برعکس. با این حال با افزایش دما اتمها شروع به بسی‌نظم شدن می‌کنند. در این مسئله، در 450°C مکانهای $0, 0, 0$ به صورت $18 \text{ Cu} - 82 \text{ Zn}$ است، در حالی که مکانهای $1/2, 1/2, 1/2$ به صورت $90 \text{ Cu} - 10 \text{ Zn}$ است و تمام به صورت درصد اتمی). بنابراین دو مکان یکسان نیستند و ساختار آن مکعبی ساده است.

بالاتر از 470°C ، این آلیاژ کاملاً بی‌نظم و تصادفی می‌شود، به طوری که برای اتمهای مس هیچ ارجحیتی در اینکه اتمهای روی دور آنها را بگیرند، وجود ندارد. تحت این شرایط، محلول جامد جانشینی (به جای برنج β' برنج β نامیده می‌شود) ساختار bcc دارد، زیرا احتمال داشتن همان ترکیب میانگین در مراکز و گوشه‌های سلول واحد یکسان است. ▲

۴-۴ عیوب در بلورها

هم‌اکنون نوعی عیب را در بلورها مشاهده کردیم در اینجا يك تهیجای لازم بود تا نامتعادل بودن بار الکتریکی را جبران کند (شکل ۴-۳-۲). وقتی عیوبی نظیر تهیجایها فقط يك یا چند اتم را دربرگیرد، آن را عیوب نقطه‌ای می‌نامیم. عیوب دیگری ممکن است در میان بلور به صورت خطی وجود داشته باشند، بنابراین واژه عیوب خطی در مورد آنها به کار می‌رود. اگر تغییر شکل پلاستیکی بلور به وسیله تنشهای برشی انجام می‌گیرد، این دسته از عیوب اهمیت ویژه‌ای خواهند یافت. در حقیقت حضور تعداد کمی از آنها باعث می‌شود که بلورهای فلزی ۱۰۰۰ بار انعطاف پذیرتر شوند. اگر این عیوب خطی به تعداد زیاد وجود داشته باشند موجب افزایش استحکام فلز می‌شوند. بالاخره نوع دیگری از عیوب از نظر مفهوم دو بعدی‌اند و شامل سطوح خارجی یا مرزهای داخلی‌اند.

عیوب نقطه‌ای. ساده‌ترین عیب نقطه‌ای تهیجای است، که عبارت از اتم گم‌شده‌ای درون فلز است. [شکل ۴-۴-۱ (الف)]. این عیوب می‌توانند نتیجه ترتیب و فشردگی ناقص



شکل ۴-۴-۱ عیوب نقطه‌ای، (الف) تهیجای □، (ب) تهیجای دوتایی؛ (ج) تهیجای جفت‌یونی (عیب شاتکی)؛ (د) بین‌نشینی؛ (ه) جابه‌جایی یون (عیب فرنکل).

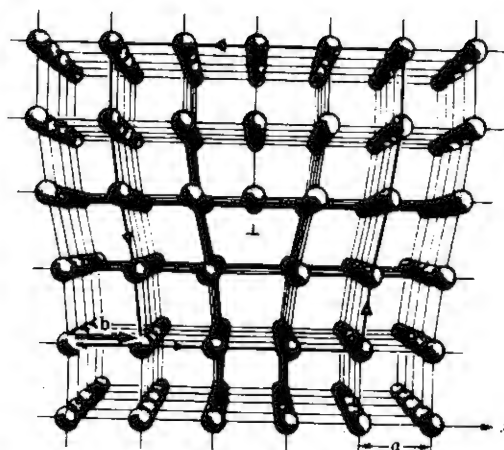
درحین تبلور اولیه باشند، یا در اثر ارتعاشات گرمایی اتمها در دماهای بالا به‌وجود آیند (بخش ۴-۶)، زیرا با افزایش انرژی گرمایی، احتمال اینکه هریک از اتمها از مکان خود، در پایستری سطح انرژی، بیرون‌جهند، زیاد می‌شود. تهیجایها می‌توانند تکی باشند، مانند ۴-۴-۱ (الف) یا دو یا چند تهیجای می‌توانند به‌هم پیوندند و تهیجای دوتایی [شکل ۴-۴-۱ (ب)] یا سه‌تایی تشکیل دهند.

تهیجای جفت‌یونی. (که عیب شاتکی نامیده می‌شود) در ترکیباتی یافت می‌شود که در آنها تراژمندی بار باید حفظ شود [شکل ۴-۴-۱ (ج)]. این ترکیبات دارای تهیجایهای جفت‌یونی با بار مخالف‌اند. تهیجای جفت‌یونی نیز مانند تهیجای تکی نفوذ اتمی را آسان‌تر می‌کند (بخش ۴-۷).

گاهی اتم اضافی، خود را درون ساختار بلوری جای می‌دهد به‌ویژه اگر ضریب فشردگی اتمی پایین باشد. چنین عیبی را که باعث اعوجاج ساختمان اتمی می‌شود، بین‌نشینی می‌نامند [شکل ۴-۴-۱ (د)].

جابه‌جایی یون از شبکه به‌محل بین‌نشینی [شکل ۴-۴-۱ (ه)] عیب فرنکل نام دارد. در ساختارهای فشرده بین‌نشینی و عیوب فرنکل کمتر از تهیجایهاست، زیرا برای بردن اتمها به‌محلهای بین‌نشینی انرژی اضافی لازم است.

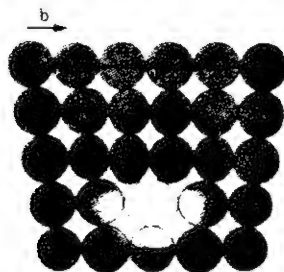
عیوب خطی (ناجاییها). معمولترین نوع عیب خطی در درون بلور، ناجایی است.



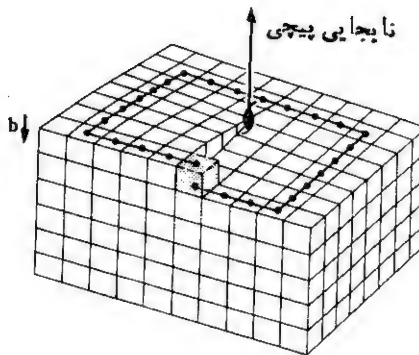
شکل ۴-۴-۲ نابجایی لبه‌ای، \perp ، عیب خطی در لبه صفحه اضافی آنها به وجود می‌آید. بردار لغزش b میزان جابه‌جایی حاصل است.

شکل ۴-۴-۳ نابجایی لبه‌ای را نشان می‌دهد. می‌توان آن را به صورت لبه صفحه اتمی اضافی در درون ساختار بلوری تعریف کرد. همراه بسا نابجایی لبه‌ای ناحیه‌های فشاری و کششی وجود دارند (شکل ۴-۴-۳)، به طوری که در امتداد نابجایی افزایش انرژی به وجود می‌آید. مسافت جابه‌جایی آنها حول نابجایی بردار لغزش b^* ، نامیده می‌شود. این بردار با خط نابجایی لبه‌ای زاویه قائمه می‌سازد.

نابجایی پیچی شبیه به پلکان مارپیچی است که خط عیب آن در امتداد محور قرار دارد (شکل ۴-۴-۴). بردار لغزش آن موازی بسا خط عیب است. تنشهای برشی به اتمهای مجاور نابجایی پیچی مربوط است؛ در نتیجه مانند حالت قبلی یعنی نابجایی لبه‌ای



شکل ۴-۴-۳ انرژی نابجایی. در مجاورت نابجایی اتمها تحت فشار (تیره‌تر) و تحت کشش (روشن‌تر)، هستند.



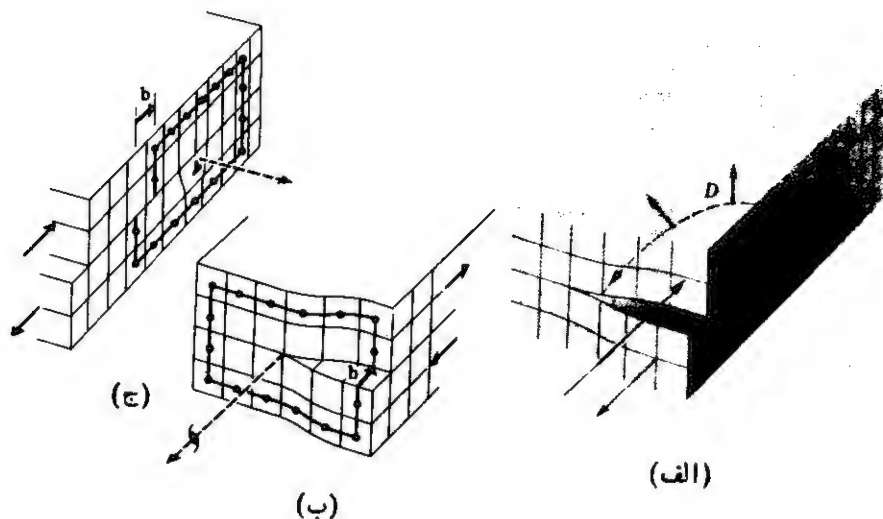
شکل ۴-۴-۴ نا بجایی پیچی (نمایش سلول واحد).
بردار لغزش b موازی عیب خطی است.

در اینجا نیز انرژی اضافی وجود دارد.

در حین تبلور هر دو نوع نا بجایی می توانند تشکیل شوند. مثلاً نا بجایی لبه‌ای وقتی به وجود می آید که در جهتگیری قسمتهای مجاور بلور در حال رشد عدم انطباق اندکی ایجاد شده باشد، به طوری که ردیفی اضافی از اتمها تشکیل یا حذف شود. طبق شکل ۴-۴-۴ نا بجایی پیچی موجب می شود که بلور به آسانی رشد کند زیرا اتمها و سلولهای واحد بیشتری می توانند به «پله» پیچ اضافه شوند. بنا بر این استفاده از واژه پیچی مناسب است، زیرا همراه با رشد بلور، پله‌ای حول محور بلور تاب می خورد.

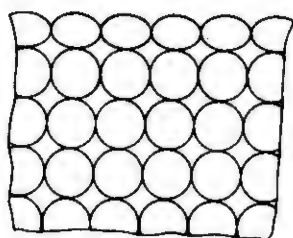
نا بجاییها معمولاً در حین تغییر شکل به وجود می آیند. چنانکه در شکل ۴-۴-۵ دیده می شود، در اینجا تنش برشی باعث به وجود آمدن هر دو نا بجایی، لبه‌ای و پیچی، می شود. در نهایت هر دوی آنها جا به جایی یکسانی تولید می کنند و در حقیقت با خط نا بجایی تشکیل شده به هم مربوط می شوند.

سطوح. عیوب بلوری ممکن است به صورت مرز در دو بعد گسترش یابند. آشکارترین مرز، سطح خارجی جسم است. اگر چه می توانیم سطح را به سادگی انتهای ساختار بلوری در نظر گیریم، ولی باید سریعاً این حقیقت را دریافت که کوئوردیناسیون اتمها در سطح، با اتمهای درون بلور قابل مقایسه نیست. اتمهای سطحی فقط از یک طرف همسایه دارند (شکل ۴-۴-۶)، بنابراین نسبت به اتمهای درونی انرژی بیشتری دارند و پیوندشان سست تر است. این انرژی را می توان با کمک شکل ۴-۵-۲ (ب) تفسیر کرد، به این ترتیب که اگر اتمهای اضافی قرار بود روی اتمهای سطحی بنشینند، در اینجا نیز، مانند مورد آمیختگی دو اتم مجزا انرژی آزاد می شد. بهترین دلیل مشهود، وجود انرژی سطحی در قطرات مایع است، این قطرات شکل کروی به خود می گیرند تا سطح خارجی بر واحد حجم (و در نتیجه انرژی سطحی) را کمینه کنند. جاذبه سطحی نیز گواه دیگری بر وجود اختلاف



شکل ۴-۴-۵ تشکیل نابجایی به وسیلهٔ برش الف) خط نابجایی، D' ، در میان بلور گسترش می‌یابد تا جا به جایی کامل شود؛ ب) چنین عیبی نابجایی پیچی ایجاد می‌کند که خط آن موازی جهت برش است؛ ج) عیب خطی، نابجایی لبه‌ای است که خط آن عمود بر جهت برش است.

سطح



شکل ۴-۴-۶ نمایش طرحوار اتمهای سطحی. از آنجا که این اتمها به وسیلهٔ اتمهای دیگر کاملاً احاطه نشده‌اند، از اتمهای درونی انرژی بیشتری دارند.

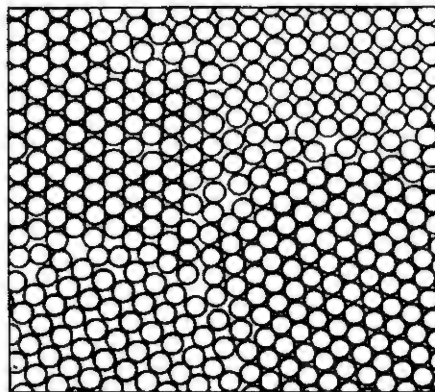
انرژی در سطح است.

هوزدانه‌ها. اگرچه ماده‌ای مانند مس در یک سیم الکتریکی ممکن است تنها شامل یک فاز باشد، یعنی فقط یک ساختار (fcc) داشته باشد، ولی معمولاً شامل تعداد زیادی بلور با

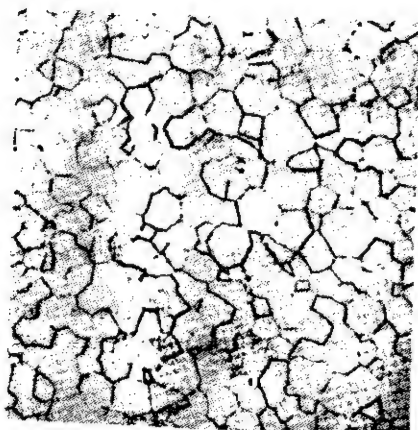
جهتگیریهای گوناگون است. هر يك از این بلورهای تنها، دانه نامیده می‌شوند. شکل دانه در جامدات معمولاً با حضور دانه‌های مجاور کنترل می‌شود. در درون هر دانه بخصوص تمام سلولهای واحد با يك جهتگیری و يك الگو مرتب شده‌اند. با این حال در مرز دانه بین دودانه مجاور ناحیه انتقال وجود دارد که با هیچ کدام از دودانه مطابقت ندارد (شکل ۷-۴-۴).

اگر چه نمی‌توانیم هر يك از اتمهایی را که در شکل ۷-۴-۲ دیده می‌شود ببینیم، ولی اگر فلز را حکاری کنیم می‌توانیم محل مرز دانه‌ها را به راحتی در زیر میکروسکوپ ببینیم. نخست سطح فلز باید پرداخت و صاف شود به طوری که صفحه‌ای با سطح آینه مانند به دست آید، سپس آن را برای مدت زمان کوتاهی در معرض حمله مواد شیمیایی قرار می‌دهیم. اتمهایی که در سطح انتقال بین يك دانه و دانه بعدی قرار دارند بیشتر از اتمهای دیگر حل می‌شوند و خطی به جا می‌گذارند که با میکروسکوپ دیده می‌شود (شکل ۷-۴-۸)؛ مرز دانه حل شده برعکس بقیه قسمت‌های دانه به صورت آینه کامل عمل نمی‌کند (شکل ۷-۴-۹).

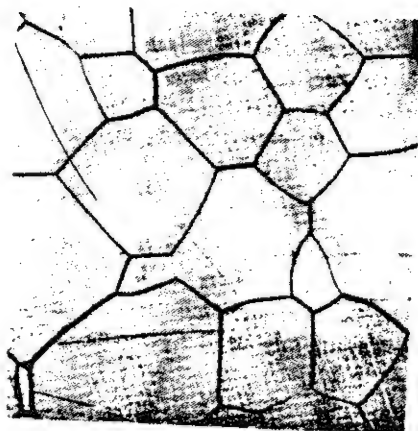
مرز دانه را می‌توان دوبعدی در نظر گرفت، گرچه ممکن است به شکل منحنی باشد و عملاً ضخامت محدودی برابر ۲ تا ۳ فاصله اتمی داشته باشد. عدم انطباق جهتگیری دانه‌های مجاور باعث می‌شود که در امتداد مرز، تراکم اتمی کمتری به وجود آید. بنابراین اتمهای واقع در امتداد مرز از اتمهای درون دانه انرژی بیشتری دارند. به همین دلیل همان طور که قبلاً تشریح شد در امتداد مرز دانه‌ها حکاری سریعتر انجام می‌شود. انرژی بسالتر اتمهای مرزی برای جوانه زنی در تغییرات فازی، چند شکلی نیز مهم است (بخش ۳-۴). فشردگی اتمی کمتر در امتداد مرزها، نفوذ اتمی را آسانتر می‌کند (بخش ۷-۴)، و عدم انطباق بین دانه‌های مجاور پیشرفت حرکت نابجاییها را کاهش می‌دهد (شکل ۷-۴-۵). بنابراین



شکل ۷-۴-۴ مرز دانه‌ها. به سطح نامنظم در مرز توجه کنید.

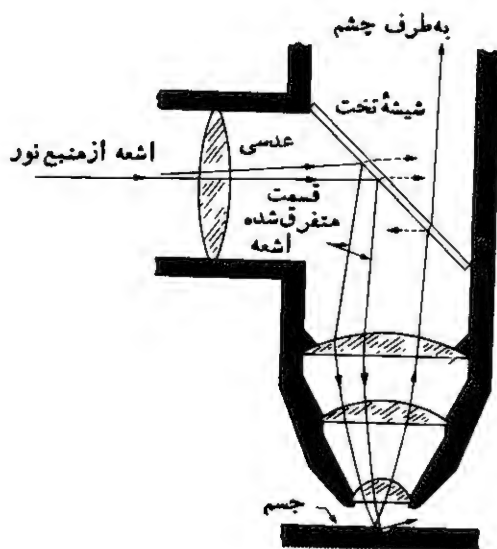


(ب)



(الف)

شکل ۴-۴-۸ مرزدانه‌ها، الف) مولیبدن (با بزرگنمایی ۲۵۰)، ب) پریکل‌س، MgO ، یا چکالی زیاد (با بزرگنمایی ۲۵۰).



شکل ۴-۴-۹ مشاهده مرزدانه. فلز پرداخت و حکاری شده است. مرز خورده شده نور را به‌درون میکروسکوپ منعکس نخواهد کرد.

مرزدانه، کرنش پلاستیکی ماده را کاهش می‌دهد.*

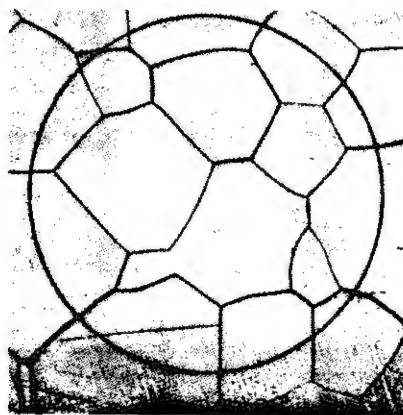
* در دماهای معمولی، مرزدانه‌ها مانع لغزش می‌شوند. در نتیجه ماده دیردانه محکمتر ←

اندازه دانه و مساحت مرزدانه. واضح است که دو میکروساختار شکل ۲-۴-۸ متفاوت اند در شکل ۲-۴-۸ (الف) دانه‌ها از دانه‌های شکل ۲-۴-۸ (ب) بزرگترند. برعکس این، MgO نسبت به مولیدن سطح مرزدانه بیشتری دارد. (هر دو با بزرگنمایی ۲۵۰ نشان داده شده‌اند یعنی ابعاد خطی آنها ۲۵۰ مرتبه بزرگتر شده است.)

از آنجا که مرزدانه‌ها به طرق مختلف روی ماده اثر می‌گذارند، دانستن مقدار مساحت مرزدانه در واحد حجم، S_v ، اهمیت دارد. این مساحت را می‌توان به سادگی با قراردادن خطی در عرض میکروساختار تخمین زد. البته این خط در مواد دیزدانه، مرزدانه بیشتری را قطع می‌کند تا در مواد دشت دانه. رابطه آن به این صورت است

$$S_v = 2P_L \quad (۲-۴-۱)$$

که در آن P_L تعداد نقاط برخورد بین خط و مرزدانه‌ها در واحد طول است. رابطه بالا را ثابت نمی‌کنیم، ولی می‌توانیم آن را در شکل ۲-۴-۱۰ نشان دهیم. در این شکل دایره‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متری را به طور تصادفی روی عکس شکل میکروسکوپی قبلی مولیدن قرار می‌دهیم. ۱۱ محل تقاطع وجود دارد. از آنجا که بزرگنمایی $\times 250$



شکل ۲-۴-۱۰ محاسبه مساحت مرزدانه. از آنجا که بزرگنمایی ۲۵۰ است، محیط واقعی دایره برابر $\pi(50 \text{ mm})/250$ یا 0.63 mm خواهد بود. این دایره مرزدانه‌ها را در ۱۱ نقطه قطع می‌کند. در نتیجه با توجه به رابطه (۲-۴-۱)، مساحت مرزدانه در هر mm^3 معادل $(11/0.63) \times 2$ یا 35 mm^2 خواهد بود.

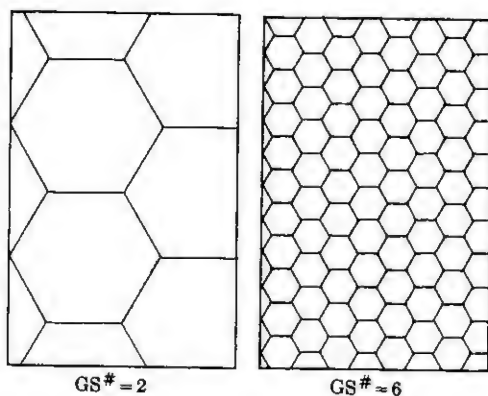
از ماده دشت دانه است. در دماهای بالا مرزدانه‌ها می‌توانند نابجاییها را همراهی کنند. در نتیجه موقعیت برعکس شده و به خزش منجر می‌شود (بخش ۶-۷).

است. محیط واقع روی فلز در حقیقت $0.63 \text{ mm} = \pi/250 = 50$ است و مقدار P_L ، $17.5 \text{ mm} = 0.63/11$ است. بر اساس رابطه (۴-۴-۱)، سطح آن در واحد حجم، S_v ، $35 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ است. این را می‌توان با مساحت مرزدانه‌های MgO در شکل ۴-۴-۸ (ب)، در مثال ۴-۴-۱، مقایسه کرد.

اگر چه مرزدانه‌ها صور میکروساختارند که به رفتار خواص مربوط می‌شوند ولی معمولاً به اندازه دانه استناد می‌شود. روش تعیین عدد اندازه دانه توسط انجمن امریکایی آزمایش و مواد (ASTM) به صورت استاندارد در آمده است و گرچه تجربی است ولی شاخص کمی و قابل تجدید است که از ۲ عنوان پایه استفاده می‌کند

$$N_{(0.0645 \text{ mm}^2)} = 2^{* - 1} \quad (4-4-2)$$

N تعداد دانه‌های مشاهده شده در سطح 0.0645 mm^2 است. * مقدار n عدد اندازه دانه (G. S. #) است. مثال ۴-۴-۲ مقدار G. S. # را برای مولیدن، که در شکل ۴-۴-۸ (الف) دیده می‌شود، محاسبه می‌کند. شکل ۴-۴-۱۱ دو مجموعه از شبکه اندازه دانه‌ها را نشان می‌دهد که می‌توان از آنها برای تعیین سریع چشمی عدد اندازه دانه عکس زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی ۱۰۰ استفاده کرد. این اعداد اندازه دانه به عملیات گرمایی فولادها (بخش ۱۱-۶) و دمای انتقال فولادها (بخش ۸-۶) مربوط می‌شود.



شکل ۴-۴-۱۱ عدد اندازه دانه (ASTM). عدد بزرگ اندازه دانه
 G. S. # (رابطه ۴-۴-۲). بیانگر دانه‌های بیشتر و مساحت مرزدانه
 زیادتر در واحد حجم است. ($\times 100$)

* این سطح برابر 1 in^2 با بزرگنمایی $\times 100$ است. این روش با استفاده از میکروسکوپی با عکس $\times 100$ استاندارد شده است و با شمارش دانه‌های موجود در سطح $1 \text{ in} \times 1 \text{ in}$ (1 in^2) انجام می‌شود.

مثال ۴-۴-۱ سطح مرزدانه‌های MgO شکل ۴-۴-۸ (ب) را در واحد حجم تخمین بزنید.

حل: خطی به طول ۵۰ mm به‌طور تصادفی روی شکل قرار دهید و محل تقاطع آن را با مرزدانه‌ها بشمارید. اگر با ۵ مرتبه تکرار این عمل اعداد ۱۳، ۱۷، ۱۲، ۱۴، و ۱۲ را به‌دست آورده‌اید در ۲۵۰ mm عدد به‌دست آمده خواهد بود. ولی بزرگنمایی $\times ۲۵۰$ است بنابراین $۶۸/\text{mm}$ خواهد بود.

$$S_v = 2(68/\text{mm}) = \sim 140/\text{mm} \quad (\text{یا } 140 \text{ mm}^2/\text{mm}^3)$$

توضیح. برای MgO شکل ۴-۴-۸ سطح مرزدانه در واحد حجم چهار برابر مولیدن است. هر دو عدد به‌طور تخمینی به‌دست آمده‌اند. ولی با دقت کافی می‌توان جوابی با $\pm 10\%$ دقت به‌دست آورد که در بیشتر موارد کافی است. ▲

مثال ۴-۴-۲ مقدار ASTM G.S. # را برای مولیدن شکل ۴-۴-۸ (الف) معین کنید.

حل: سطح این شکل بزرگ شده $(59 \text{ mm})^2$ است

$$\text{سطح واقعی} = \left(\frac{59 \text{ mm}}{250} \right)^2 = 0.056 \text{ mm}^2$$

در این سطح تقریباً ۱۷ دانه وجود دارد. (به توضیح توجه کنید.)

$$\frac{\sim 17}{0.056 \text{ mm}^2} = \frac{N}{0.0645 \text{ mm}^2}$$

$$N = \sim 20 = 2^{2-1}$$

$$n = 5^+$$

توضیح. عکس شکل میکروسکوپی شکل ۴-۴-۸ خود نمونه‌ای است و بنابراین دستخوش تغییرات آماری است. در نتیجه نباید دقت زیادی از آن انتظار داشته باشیم. علاوه بر این خیلی کم پیش می‌آید که در تخمین عدد اندازه دانه دقتی بیش از $\pm 5\%$ لازم باشد.

تعداد دانه‌ها در سطحی که به‌صورت نمونه ارائه شده است به‌سادگی با مراحل زیر به‌دست می‌آید: (۱) شمارش دانه‌هایی که درون سطح وجود دارد؛ (۲) افزودن نصف تعداد دانه‌هایی که روی لبه قرار دارند، به مقدار شمارش شده (زیرا با سطوح مجاور مشترکند)؛ و (۳) سپس افزودن یک چهارم هر یک از چهار دانه موجود در گوشه‌ها. اگر نمونه دیگری

از فلز را در شکل ۴-۳-۸ (الف) در نظر بگیرید و شمارش حداقل ۱۵ و حداکثر ۲۰ باشد عدد اندازه دانه هنوز $n=5^+$ خواهد بود. برای آنکه عدد اندازه دانه یکی بیشتر شود شمارش باید دو برابر شود. ▲

مثال ۴-۴-۳ اندازه‌گیری بسیار دقیقی (تا چهار رقم با معنی) از چگالی آلومینیم به عمل آمده است. اگر فلز سریعاً از 650°C سرد شود، $\rho = 2698 \text{ Mg/m}^3$ می‌شود. این مقدار را با چگالی تئوری که از راه تجزیه به وسیله تفرق به دست آمده و در آن مقدار a برابر 0.4049 nm تعیین شده است، مقایسه کنید.

حل: از آنجا که وزن اتمی آلومینیم 26.98 واحد جرم اتمی و ساختار آن fcc است.

$$\rho_{\text{تئوری}} = \frac{4(26.98 \text{ amu}) / (0.6022 \times 10^{24} \text{ amu/g})}{(0.4049 \times 10^{-9} \text{ m})^3} = 2700 \text{ Mg/m}^3$$

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{تئوری}}} = \frac{2698}{2700} = 0.999$$

یا تقریباً ۱ تهیجای در مقابل هر ۱۰۰۰ اتم وجود دارد.

توضیح. اندازه‌ها نزدیک به هم اند. آلومینیم مانند بیشتر فلزات درست زیر نقطه ذوب خود به ازای هر 10^3 اتم ۱ تهیجای دارد. در قسمتهایی که تعادل وجود دارد در نصف دمای مطلق ذوب این مقدار به ۱ تهیجای به ازای هر 10^7 اتم می‌رسد. ▲

۴-۵ مواد غیر بلوری

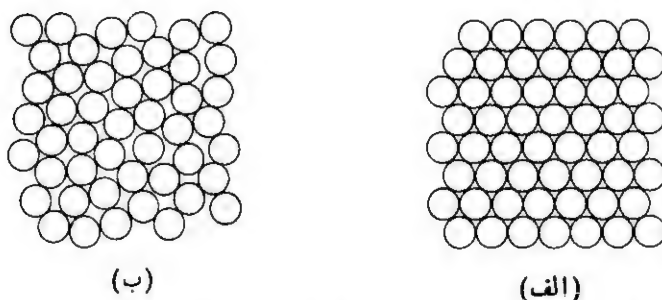
در بعضی از مواد مهم مهندسی و علمی نظم پر دامنه وجود ندارد. این شامل تمام مایعات، شیشه، اکثر پلاستیکها، و تعداد کمی از فلزات می‌شود، به شرط آنکه این فلزات از حالت مذاب فوق‌العاده سریع سرد شوند. در اصل می‌توانیم این عدم تکرار ساختار را به صورت بی‌نظمی حجمی یا سه بعدی، و به عنوان پیامد عیوب نقطه‌ای، عیوب خطی، و مرز دانه‌های دوبعدی تصویر کنیم. این مواد را در مقایسه با مواد بلوری، بی‌شکل می‌نامیم.

مایعات. در بیشتر موارد مایعات میال‌اند (یعنی تحت اثر جرم خود جریان می‌یابند). ولی همچنان که شیره قند در دی‌ماه نیمه صلب می‌شود، مایعات گوناگون مهم صنعتی نیز بدون اینکه متبلور شوند، می‌توانند بسیار ویسکوز و حتی جامد شوند.

نخست به بی‌نظمی به وجود آمده در فلز یک جزئی، هنگام نزدیک شدن به نقطه ذوب فلز و تبدیل آن به حالت مایع نظری می‌افکنیم. برای مثال می‌توانیم آلومینیم را مورد بررسی

قرار دهیم. همان طور که در بخش قبل گفته شد، انرژی گرمایی بیشتر در دمای بالاتر نه تنها باعث به وجود آمدن ارتعاشات گرمایی بیشتر می شود، بلکه تعدادی تهیجای نیز تولید می کنند. آلومینیم متبلور در اندکی کمتر از نقطه ذوب می تواند تا حدود ۰.۱٪ تهیجای در شبکه خود داشته باشد. اگر تعداد تهیجاها در ساختار فشرده به حدود ۱٪ برسد، «آشوب حکمفرما می شود». عسلد کوئوردیناسیون ۱۲ همیشگی برهم می خورد و نظم پدانه ساختار بلوری از بین می رود (شکل ۴-۵-۱).

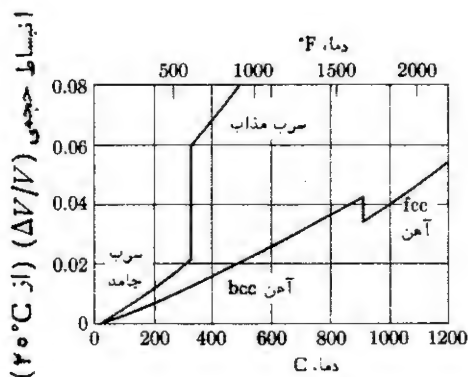
این بی نظمی حاصل از ذوب، حجم بسیاری از مواد را افزایش می دهد.* (شکل ۴-۵-۲). با این بی نظمی، تعداد همسایگان نزدیک هراتم از ۱۲ به ۱۱ یا ۱۰ تنزل پیدا می کند، با این حال در این مورد الگوی معینی وجود ندارد، بنا بر این قضای مربوط به هراتم و فاصله متوسط بین اتمی چند درصد اضافه می شود. هر ماده ای برای ذوب شدن به مقدار مشخصی انرژی احتیاج دارد. این انرژی را گرمای ذوب می نامیم. از آنجاکه گرمای ذوب (ΔH_f) انرژی لازم برای ایجاد بی نظمی در یک مول از اتمهای ماده، و دمای ذوب (T_m) مقیاسی برای اندازه گیری استحکام پیوند اتمی است؛ رابطه ای کلی بین این دو به دست می آید (جدول ۴-۵-۱)*.



شکل ۴-۵-۱ مذاب (فلز). (الف) فلز متبلور با $CN=12$ (۶ اتم در صفحه به علاوه ۳ اتم بالا و ۳ اتم پایین)؛ (ب) فلز مایع، نظم پدانه از بین رفته است؛ $CN < 12$ و فاصله متوسط بین اتمی اندکی افزایش یافته است.

* این افزایش حجم در مورد تمام موادی است که ساختار فشرده داشته و پیوندهای جهتدار نداشته باشند. تعداد اندکی از مواد با ضریب فشرده گی کم و پیوندهای فضاویژه (فصل دوم) وقتی در اثر گرما برانگیخته شوند به صورت ساختارهای متراکم تر فرو می ریزند. آب مهمترین ماده در بین این استثناهاست.

* برای آنکه همبستگی خوبی برقرار باشد باید مواد مشابهی را مثلا در بین فلزات، در نظر بگیریم.



شکل ۴-۵-۲ تغییرات حجم، (بر اساس حجم در 20°C). الف) سرب با تقریباً ۴ درصد حجمی انبساط از حالت fcc به حالت مذاب؛ ب) در 912°C آهن bcc به fcc تبدیل می‌شود و تغییر حجم می‌یابد (مثال ۳-۴-۱).

شیشه‌ها. همان‌طور که قبلاً نشان داده شد، شیشه‌ها را به‌عنوان جامدات بسیار ویسکوز در نظرمی گیرند، زیرا غیر بلوری‌اند. با این‌حال عملاً فقط تعداد کمی از مایعات می‌توانند به‌صورت شیشه درآیند. در نتیجه برای اینکه بتوانیم وجه تمایزی قائل شویم، باید به‌ساختار شیشه نظر دقیق‌تری بیفکنیم.

در دماهای بالا شیشه‌ها مایعات حقیقی تشکیل می‌دهند. آنها می‌توانند آزادانه در اطراف حرکت کنند و به‌تشهای برشی پاسخ دهند. اگر شیشه تجارتنی در دمای مربوط به‌حالت مایع خود فوق سرد شود، انقباض گرمایی ناشی از نوآرایی آنها به‌وجود می‌آید که موجب فشردگی مؤثرتر آنها می‌شود. این انقباض در تمام فازهای مایع عمومیت دارد (شکل ۴-۵-۳). با این‌حال با سرد کردن بیشتر، در ضریب انبساط شیشه‌ها تغییری ناگهانی رخ می‌دهد. زیر دمای مشخصی که دمای انتقال شیشه‌ای یا به‌عبارتی ساده‌تر دمای شیشه‌ای، T_g نام دارد. نوآرایی آنها دیگر اتفاق نمی‌افتد و انقباض، تنها در نتیجه ارتعاشات گرمایی کوچک‌تر رخ می‌دهد. این ضریب انبساط گرمایی پایینتر را می‌توان با ضریب گرمایی در بلورها، مقایسه کرد که در آن ارتعاشات گرمایی تنها عامل ایجادکننده انقباض است و نوآرایی آنها به‌وجود نمی‌آید.

لغت شیشه به‌موادی گفته می‌شود که مشخصات انبساطی آنها شبیه به‌شکل ۴-۵-۳ باشد. شیشه‌ها ممکن است غیر آلی و یا آلی باشند و با نظم کم دامنه (نداشتن نظم پردامنه) مشخص می‌شوند. شکل ۴-۵-۴ نشان‌دهنده یکی از ساده‌ترین شیشه‌ها (B_2O_3) است، که در آن هر اتم کوچک بور در میان ۳ اتم بزرگ‌تر اکسیژن جامی گیرد. از آنجا که بور سه ظرفیتی و اکسیژن دوظرفیتی است، اگر هر اتم اکسیژن بین دو اتم بور قرار گیرد توازن

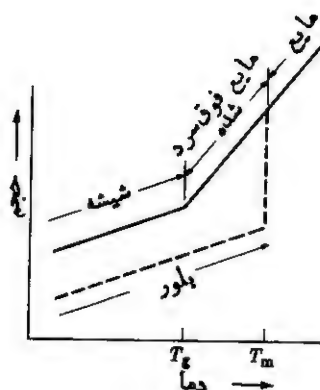
جدول ۴-۵-۱ گرمای ذوب فلزات

فلز	دمای ذوب °C(°F)	گرمای ذوب ژول بر مول*
تنگستن، W	۳۳۸۲(۶۱۲۹)	۳۲۰۰۰
مولیبدن، Mo	۲۶۲۳(۴۷۵۳)	۲۸۰۰۰
کرم، Cr	۱۸۶۳(۳۳۸۵)	۲۱۰۰۰
تیتانیوم، Ti	۱۶۷۲(۳۰۴۲)	۲۱۰۰۰
آهن، Fe	۱۵۳۸(۲۸۰۰)	۱۵۳۰۰
نیکل، Ni	۱۴۵۵(۲۶۵۱)	۱۷۹۰۰
مس، Cu	۱۰۸۴(۱۹۸۳)	۱۳۵۰۰
آلومینیم، Al	۶۶۰(۱۲۲۱)	۱۰۵۰۰
منیزیم، Mg	۶۴۹(۱۲۰۰)	۹۰۰۰
روی، Zn	۴۱۹(۷۸۷)	۶۶۰۰
سرب، Pb	۳۲۷(۶۲۱)	۵۴۰۰
جیوه، Hg	-۳۸(-۳۸)	۲۳۴۰

* ژول بر $10^{24} \times 6.02 \times 10^{23}$ اتم؛ $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$.

الکتریکی محفوظ می ماند. در نتیجه ساختار پیوسته ای از اتمهایی که محکم به یکدیگر پیوند یافته اند به وجود می آید. زیر دمای انتقال شیشه ای که اتمها نمی توانند نوآرایی یابند، مشخصات سیالیت از بین می رود و جامد غیر بلوری تشکیل می شود. چنین جامدی مقاومت قابل توجهی در مقابل تنشهای برشی دارد و در نتیجه نمی تواند مایعی حقیقی به حساب آید.

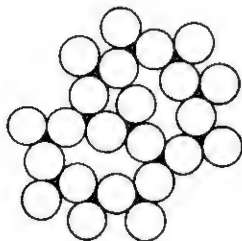
مشخصات دما-حجم شکل ۴-۵-۳ نخستین بار در شیشه های سیلیکاتی مشاهده شد (بخش ۵-۸). با این حال خیلی زود آشکار شد که این مشخصات در مواد پلی مری نیز اهمیت بسزایی دارد. بنابراین در فصل هفتم، دمای انتقال شیشه ای (T_g) را به دقت بررسی خواهیم کرد. زیر دمای T_g پلی مرها سخت و شکننده اند، و ثابت دی الکتریک پایینی دارند. بالای



شکل ۴-۵-۳ تغییرات حجمی در مایعات فوق سرد شده و شیشه‌ها. وقتی مایعی سرد می‌شود. سریع و به‌طور مداوم منقبض می‌شود زیرا با کاهش ارتعاشات گرمایی، آنها آرایشی با فشردگی مؤثرتری می‌یابند. در صورت غیر بلوری بودن، انقباض زیر T_m تا دمای انتقال شیشه‌ای، T_g که در آن ماده به‌صورت شیشه‌ای صلب درمی‌آید، ادامه می‌یابد. زیر T_g نوآوری پدید نمی‌آید و تنها انقباض به‌وجود آمده به‌علت ارتعاشات گرمایی آنها در مکن استقرار آنها صورت می‌گیرد.

T_g ، پلاستیک‌ها خمش‌پذیر و حتی لاستیکی می‌شوند و تغییرات هم‌رسی نیز در ثابت دی‌الکتریک آنها ایجاد می‌شود.

فازها. قبلاً در مورد فازها بحث کردیم. در طول این کتاب چندبار دیگر نیز در مورد آنها



شکل ۴-۵-۴ ساختار شیشه B_2O_3 . اگرچه نظم پیرامونی بلوری در آن وجود ندارد، ترتیب کم‌دامنه‌ای موجود است. هر اتم بور بین سه اتم اکسیژن قرار دارد، هر اتم اکسیژن با دو اتم بور کوئوردیناس شده است.

بحث خواهیم کرد. در اینجا می‌توانیم فازها را به صورت قسمتی از ماده که به وسیله ساختار یا ترکیب، از دیگر قسمت‌ها متمایز می‌شوند، تعریف کنیم. «یخ-آب» را در نظر بگیرید با وجود آنکه ترکیب یکسان است، یخ جامدی بلوری با شبکه منشور شش بر است، در حالی که آب مایع است. هر دو فاز بین آن دو، در ساختار، ناپیوستگی ایجاد می‌کند، بنابراین آنها دو فاز مجزا هستند. یا مس با روکش نقره را در نظر بگیرید. مس و نقره هر دو fcc هستند؛ با این حال اتمهای نقره به اندازه کافی بزرگتر از اتمهای مس اند، به طوری که در دمای اتاق تقریباً ناپیوستگی کاملی در ترکیب وجود دارد. بنابراین دو فاز جداگانه را تشکیل می‌دهند.

معمولاً دو فاز هر ماده هم در ترکیب و هم در ساختار تفاوت‌های آشکاری دارند، مثلاً پلاستیکی که با الیاف شیشه‌ای تقویت شده باشد. در مقابل بعضی از فازها وجه تمایز خود را از دست می‌دهند و در یکدیگر حل می‌شوند، مثلاً بعد از اینکه شکر در قهوه حل شد دیگر فاز مجزایی نیست. همین امر در مورد روی نیز صادق است. روی hcp است ولی هنگام تولید برنج، در مس (fcc) حل می‌شود و محلول جامد تک‌فازی به وجود می‌آورد. بر اساس بحث بالا، محلول (مایع یا جامد) فازی است که بیش از یک جزء دارد و مخلوط، ماده‌ای با بیش از یک فاز است.

فازهای بلوری زیادی وجود دارند زیرا جایگشتها و ترکیبات بیشماری از اتمها، یا گروههای اتمی وجود دارد. تعداد فازهای بی‌شکل نسبتاً کم است زیرا عدم وجود نظم پرداخته باعث می‌شود که آرایش اتمی محدودیت کمتری داشته باشد و در مقایسه با بلورها، گستره وسیعتری برای ایجاد محلول وجود داشته باشد. تنها یک فازگازی وجود دارد. اتمها یا ملکولهای گاز از یکدیگر دورند و به طور تصادفی توزیع شده‌اند، در نتیجه اجزای بخار گونه دیگری نیز می‌توانند به «ساختار» اضافه شوند. بجز در سطح اتمی یا مولکولی، ناپیوستگی دیگری در گازها مشاهده نمی‌شود.

مثال ۴-۵-۱ به کمک شکل ۴-۵-۲ ضریب فشردگی را برای الف) سرب جامد در 326°C ؛ و ب) سرب مایع در 328°C ، محاسبه کنید. (فرض کنید شعاع گلوله سخت 1750 nm را باقی بماند.)

حل: سرب ساختار fcc دارد و ضریب فشردگی (PF) اتمی آن 74% است (مثال ۳-۲-۱ الف) را ببینید؛ بنابراین افزایش حجم 21% در 326°C و 6% در 328°C به همان نسبت ضریب فشردگی را کاهش می‌دهد.

$$* R_{\text{Cu}} = 0.1278\text{ nm} \text{ و } R_{\text{Ag}} = 0.1444\text{ nm}$$

****** الیاف شیشه‌ای و پلاستیکی که ذکر آن رفت هر دو بی‌شکل‌اند. در حالی که ساختار آنها برای ایجاد یک فاز به اندازه کافی شبیه یکدیگر نیست، هر کدام می‌توانند به عنوان حلال مقدار زیادی از اجسام حل‌شدنی دیگر عمل کنند.

$$PF_{326^{\circ}\text{C}} = \frac{0.74}{1.021} = 0.725 \quad (\text{الف})$$

$$PF_{328^{\circ}\text{C}} = \frac{0.74}{1.06} = 0.698 \quad (\text{ب})$$

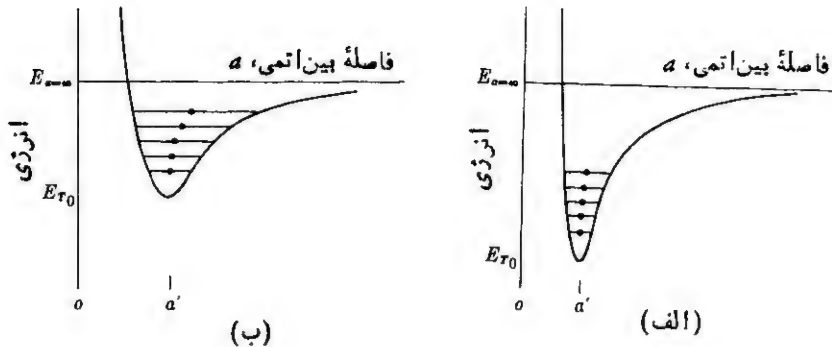
توضیح. می‌توان گفت که شعاع با افزایش طولی ۰.۷ درصد از ۰.۱۷۵ nm در ۲۰°C، به ۰.۱۷۶۲ nm در ۳۲۶°C می‌رسد تا انبساط حجمی ۲۱ درصد در آن به وجود آید، اگر چنین باشد ضریب فشردگی در ۳۲۶°C نیز همان ۰.۷۴ باقی خواهد ماند و ضریب فشردگی مایع ۰.۷۱۳ می‌شود. نمی‌توان با این نظر مخالفت کرد، زیرا یکی از تعاریف شعاع، نصف نزدیکترین فاصله بین اتمی است. در هر صورت در دمای ذوب، در فشردگی مؤثر يك ناپیوستگی ناگهانی وجود دارد. ▲

۴-۶ ارتعاشات اتمی

اتمهای يك ماده فقط در ۰K (۲۷۳°C یا ۴۶۰°F -) ساکن می‌شوند. تحت این شرایط اتمها در میان همسایه‌های خود در پایینترین سطح انرژی قرار می‌گیرند، [شکل ۲-۵-۲ (ب)]، با افزایش دما، افزایش انرژی، نوسان اتمها را در فواصل بین اتمی بزرگتر و کوچکتر ممکن می‌سازد. با این حال همان طور که از چاه انرژی شکلی که قبلاً ارائه شد، می‌توان توجیه کرد، جابه‌جاییها در دو جهت متقارن نیستند، یعنی برای سطح انرژی مشخص (دمای معین)، اتمها بیش از آنکه بتوانند به طرف یکدیگر کشیده شوند، از یکدیگر دور می‌شوند. این امر موجب به وجود آمدن انبساط گرمایی می‌شود زیرا میانگین فاصله بین اتمی افزایش می‌یابد.

حتی در دمای معین همه اتمها یا مولکولها در هر لحظه بخصوص انرژی یکسانی ندارند. بلکه طیفی از انرژی بین اتمها وجود دارد که از تقریباً صفر تا مقادیر خیلی بالا گسترده شده است. البته انرژی اکثر اتمها نزدیک به میانگین است. از طرف دیگر، در يك دوره از زمان، هر اتم معین گستره‌ای از انرژی را که از تقریباً صفر تا مقادیر خیلی بالا امتداد دارد، تجربه خواهد کرد. با این حال در بیشتر موارد، انرژی اتم در حدود مقدار میانگین خواهد بود. برای برآورد احتمال اینکه اتم انرژی کافی برای شکستن پیوند خود داشته باشد و بتواند به محلهای جدید انتقال یابد، باید به طیف انرژی نظری بيفکنیم. این فرایندی است که آن را نفوذ می‌نامیم.

انبساط گرمایی. در نزدیکی دمای محیط، ظرفیت گرمایی بسیاری از جامدات اساساً ثابت است. در نتیجه می‌توان فواصل مساوی و متوالی دما را روی دره انرژی [شکل ۴-۶-۱ (الف)] معین کرد. با افزایش متوالی انرژی، فاصله بین اتمی میانه نیز افزایش می‌یابد؛



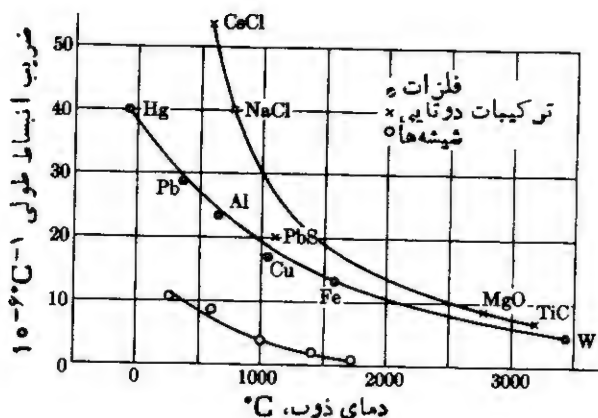
شکل ۱-۶-۴ انرژی و انبساط. (الف) جامدی یا پیوند قوی؛ (ب) جامدی با پیوند ضعیف. با افزایش انرژی گرمایی یکسان بالای دمای صفر مطلق، T_0 ، در ماده‌ای که دره انرژی عمیقتری دارد میانگین فاصله بین اتمی کمتر تغییر خواهد کرد (به شکل ۲-۵-۲ (ب) مراجعه کنید). انبساط در دماهای بالاتر (انرژی بیشتر) مشخص‌تر می‌شود.

بنابراین انبساط گرمایی که قبلاً از آن سخن گفتیم، رخ می‌دهد. به هر دو تصویر دقت کنید، در ماده‌ای با پیوند پراستحکام (نقطه ذوب بالا) که با دره انرژی عمیق مشخص می‌شود، به ازای ΔT ، تغییرات ابعادی کمتری نسبت به ماده‌ای با پیوند ضعیف، ایجاد می‌شود [شکل ۱-۶-۴ (ب)]. این امر در شکل ۲-۶-۴ دیده می‌شود، که نموداری از داده‌های بخش خلاصه مطالب فصل دوم است. شکل ۲-۶-۴ برای این نکته تأکید دارد که تعبیمها به مواد مشابه محدود می‌شوند.

تصویر دوم شکل ۱-۶-۴ گویای این نکته است که با افزایش دما، تغییر ابعاد نسبتاً مشخص‌تر می‌شود. منحنیهای مقدار میانه در شکل ۱-۶-۴ به راست خم می‌شوند. این نکته داده‌های شکل ۱-۳-۱ را تشریح می‌کند که در آن ضریب انبساط گرمایی مس و آهن با دما افزایش می‌یافت.

انبساط گرمایی فقط در مواد مکعبی و بی‌شکل، همسو است. در بلورهای دیگر مقدار انبساط با جهت تغییر می‌کند. مثلاً گرافیت (شکل ۲-۶-۴) را در نظر بگیرید، ساختار آن مشخصاً چندمسو است در نتیجه، تغییرات گرمایی شبکه را در جهت عمودی بیشتر از دو جهت افقی منبسط می‌کند.*

* مثلاً در 700°C ، ضریب انبساط گرمایی گرافیت روی صفحه لایه‌ها فقط $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ است، ولی در جهت عمود بر لایه‌ها این مقدار به $29 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ می‌رسد. هر دو مقدار ذکر شده در دمای پایین‌تر کاهش می‌یابند، و در حقیقت ضریب اولی در 400°C از صفر عبور خواهد کرد و در دمای اطاق اندکی منفی خواهد شد. مقدار دوم (عمود بر لایه‌ها) در 20°C برابر $26 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ می‌شود، به طوری که کلاً ضریب انبساط گرمایی حجمی $\alpha_v \cong \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z$ مثبت خواهد شد (مثال ۱-۶-۴ را ببینید).



شکل ۲-۶-۴ دمای ذوب بر حسب ضرب انبساط گرمایی (20°C).
 هر چه مواد پیوند محکمتر و نقطه ذوب بالاتری داشته باشند، ضرب
 انبساط گرمایی آنها کمتر است (با شکل ۱-۶-۴ مقایسه کنید). مقایسه
 باید بین مواد مشابه صورت گیرد.

این امر تعجب‌آور نیست زیرا پیوندهای بین لایه‌ها ضعیفتر از پیوندهای درون لایه‌ها هستند.

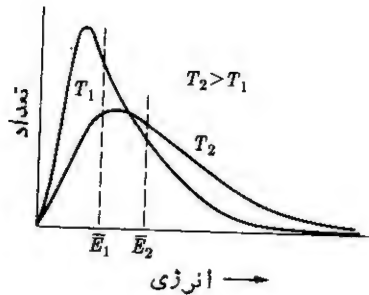
توزیع انرژی گرمایی. با افزایش دما، T ، انرژی جنبشی کل، $(K.E.)$ ، یک مول گاز افزایش
 می‌یابد. به طوری که رابطه زیر صادق است

$$K.E. = \frac{3}{2} RT \quad (۱-۶-۲)$$

در این رابطه، R همان ثابت گازهاست که در شیمی مقدماتی درباره آن بحث می‌شود و با
 توجه به واحدهای آن به صورت $1.987 \text{ cal/mole} \cdot \text{K}$ ارائه می‌شود. اگر واحد ژول
 را در سیستم SI در نظر بگیریم و به جای مول (یا $10^{24} \times 6.02 \times 10^{23}$) به یک اتم و
 مولکولها توجه کنیم، این ثابت به مقدار $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ تبدیل خواهد شد. این
 مقدار ثابت بولتسمان نامیده می‌شود و به صورت k نشان داده می‌شود. بنابراین میانگین
 $K.E.$ تک مولکول گاز از رابطه زیر پیدا می‌شود

$$K.E. = \frac{3}{2} kT \quad (۲-۶-۲)$$

با این حال همان‌طور که در پاراگراف دوم این بخش بحث شد، نمی‌توان گفت که تمام
 مولکولهای هوا در این اتاق انرژی مساوی دارند، بلکه توزیع آماری انرژی مطابق با
 شکل ۳-۶-۴ وجود خواهد داشت. در هر لحظه بخصوص، انرژی تعداد کمی از مولکولها

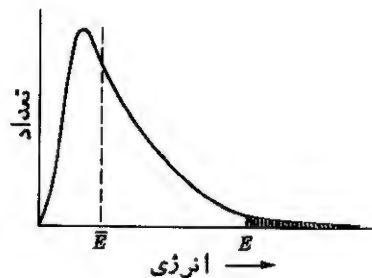


شکل ۴-۶-۳ توزیع انرژی. با افزایش دما، T ، هم انرژی میانگین \bar{E} و هم تعداد آنهایی که بیشتر از حد معینی انرژی دارند افزایش می‌یابد.

نزدیک به صفر است، انرژی بسیاری از آنها نزدیک به مقدار میانگین است، و بعضی از مولکولها انرژی فوق‌العاده زیادی خواهند داشت. با افزایش دما: (۱) انرژی میانگین مولکولها افزایش خواهد یافت؛ و (۲) تعداد مولکولهایی که بیشتر از حد معینی انرژی دارند زیاد می‌شود.

روابط بالا در مورد توزیع انرژی جنبشی مولکولهای گاز صادق است. با این حال همین اصول در مورد توزیع انرژی ارتعاشی آنها در مایعات و جامدات نیز صحیح است. به‌ویژه در هر لحظه بخصوص، تعداد قابل اغماضی از آنها دارای انرژی صفر، بسیاری از آنها دارای انرژی نزدیک به انرژی میانگین و بعضی از آنها دارای انرژیهای فوق‌العاده زیادند.

توجه ما به آنهایی که انرژی بالایی دارند معطوف خواهد شد. اغلب می‌خواهیم بدانیم احتمال اینکه انرژی آنها بیشتر از حد معینی باشد چقدر است، یعنی چه کسری از آنها دارای انرژی بیشتر از E در شکل ۴-۶-۴ هستند. راه حل آماری این مسئله را بولتسمان



شکل ۴-۶-۴ انرژیها به نسبت تعداد آنهایی که انرژی بالا دارند (سایه‌زده شده) به تعداد کل آنها، تابعی نمایی از $(-E/kT)$ است، به شرط آنکه $E \gg \bar{E}$ (رابطه ۴-۶-۳، ب).

بدین صورت ارائه کرده است

$$\frac{n}{N_{\text{کل}}} \propto e^{-(E-\bar{E})/kT} \quad (۴-۶-۳، الف)$$

در این رابطه k ثابت بولتزمان است که قبلاً تشریح شد. تعداد اتمهایی که انرژی آنها بیشتر از E است، n ، به تعداد کل اتمهای موجود N ، تابعی از دمای T است. این رابطه وقتی صادق است که E به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از انرژی میانگین \bar{E} باشد، در این حالت رابطه به‌این صورت درمی‌آید

$$\frac{n}{N_{\text{کل}}} = M e^{-E/kT} \quad (۴-۶-۳، ب)$$

که در آن M ثابت تناسب است. مقدار E معمولاً برحسب ژول بیان می‌شود. پس، k برابر $1.38 \times 10^{-24} \text{ J/atom}$ است. ولی تبدیل واحدها را می‌توان با استفاده از پیوست (الف) انجام داد.

مثال ۴-۶-۱ در 700°C ضریب انبساط خطی، α ، برای گرافیت به‌صورت زیر است

$$\alpha_{\perp} = 29 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{||} = \alpha_{\text{ای}} = 0.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$$

در اینجا α_{\perp} ضریب انبساط در جهت عمود بر لایه‌های گرافیت شکل ۲-۲-۶ و $\alpha_{||}$ ضریب انبساط در دو جهت دیگر موازی لایه‌هاست. افزایش حجم گرافیت بین 600°C و 800°C چقدر است؟

$$\text{حل: از آنجا که } V = L^3 \text{ و } V + \Delta V = (L + \Delta L_{\perp})(L + \Delta L_{||})^2$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L_{\perp}}{L} + \frac{2\Delta L_{||}}{L} + \dots$$

$$\alpha_V \Delta T \simeq (\alpha_{\perp} + 2\alpha_{||}) \Delta T = (29 + 1.6)(10^{-6}/^\circ\text{C})(200^\circ\text{C}) \\ = 0.006 \quad (\text{یا } 0.6 \text{ v/o})$$

توضیح. به‌طور کلی

$$\alpha_V \simeq \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z$$

در اینجا زیرنویسی که درست‌راست نوشته‌شده مربوط به ضرایب انبساط خطی در سه جهت

محور مختصات است (رابطه ۱-۳-۲، الف).

مثال ۴-۶-۲ در 500°C (773K) از هر 10^{14} اتم، یکی انرژی لازم برای انتقال از محل خود در شبکه به موقعیت بین نشینی را دارد. در 600°C (873K) این نسبت به 10^{-9} افزایش می‌یابد. الف) انرژی لازم برای این انتقال چقدر است؟ ب) چه کسری در 700°C (973K) انرژی کافی برای انتقال را خواهد داشت؟

حل: طبق رابطه (۴-۶-۳، ب)

$$\ln\left(\frac{n}{N_{\text{کل}}}\right) = \ln M - \frac{E}{kT} \quad (4-6-2)$$

الف)

$$\ln 10^{-10} = -22 = \ln M - \frac{E}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/atom} \cdot \text{K})(773 \text{ K})}$$

و

$$\ln 10^{-9} = -20.7 = \ln M - \frac{E}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/atom} \cdot \text{K})(873 \text{ K})}$$

با حل این دو معادله خواهیم داشت

$$\ln M = -20.92$$

و

$$E = 0.214 \times 10^{-18} \text{ J/atom}$$

یا بر حسب يك مول

$$E = 129000 \text{ J/mole} \quad (= 30900 \text{ cal/mole})$$

$$\ln\left(\frac{n}{N_{\text{کل}}}\right) = -20.92 - \frac{0.214 \times 10^{-18} \text{ J/atom}}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/atom} \cdot \text{K})(973 \text{ K})} \quad (ب)$$

$$\frac{n}{N_{\text{کل}}} \approx 6 \times 10^{-9}$$

توضیح. رابطه‌ای که به صورت معادله (۴-۶-۳) نشان داده شد در مقیاس لگاریتمی بر حسب عکس دما، $1/T$ ، به صورت خطی بیان می‌شود

$$y = C - Bx$$

یا

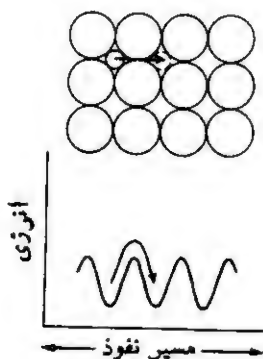
$$\ln \frac{n}{N} = C - \frac{B}{T} \quad (۴-۶-۶)$$

در اینجا $y = \ln n/N$ و $x = (1/T)$. ضریب زاویه B برابر E/k است. رابطه (۴-۶-۶) را رابطه آدنیوس می‌نامند. در حالتی که در آن دما نیروی محرکه محسوب شود، این رابطه دخالت دارد، مثلاً در رسانندگی ذاتی نیمرساناها، واکنش کاتالیزوری کنترل نشر، فرایند نفوذ در فلزات، خزش در پلاستیکها، ویسکوزیته سیالات. باز هم در مورد این رابطه بحث خواهیم کرد.

۴-۷ نفوذ اتمی

همچنان که دما افزایش می‌یابد و اتمها با انرژی بیشتری ارتعاش می‌کنند کسر کوچکی از اتمها خود را درون شبکه جابه‌جا می‌کنند. مثال ۴-۶-۲ این کسر را به دما مربوط کرده است. البته این کسر نه تنها به دما بستگی دارد، بلکه به استحکام پیوند بین اتمها نیز مربوط می‌شود. انرژی لازم برای تغییر مکان هراتم انرژی فعالساز نام دارد. این انرژی را می‌توان بر حسب کالری بر مول به صورت Q و بر حسب ژول بر اتم به صورت E (جدول ۴-۷-۲)، یا بر حسب الکترون ولت بر اتم نشان داد.

می‌توانیم از شکل ۴-۷-۱ برای نمایش طرحوار انرژی فعالساز استفاده کنیم. اتم کربن کوچک است ($r \approx 0.07 \text{ nm}$) و می‌تواند در محل بین‌نشینی بین تعدادی از اتمهای

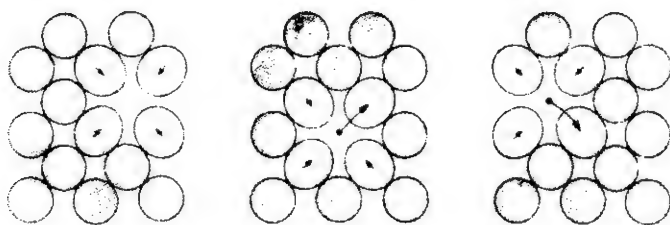


شکل ۴-۷-۱ حرکت اتمی. مکانیسم بین‌نشینی. انرژی اضافی لازم است زیرا زمانی که اتم بین نشین بخواهد به طرف محل پمدی حرکت کند، فواصل بین اتمی معمولی بین اتمهای بزرگ، تغییر خواهد کرد.

آهن جا گیرد. اگر به اندازه کافی انرژی داشته باشد، زمانی که در جهت آن ارتعاش می‌کند می‌تواند، بین اتمهای آهن فشرده شده و به محل بین نشینی بعدی برود. در 250°C ، تنها احتمال اندکی وجود دارد که این اتم آن اندازه انرژی داشته باشد. در دماهای بالاتر این احتمال افزایش می‌یابد (به مثال ۴-۶-۲ مراجعه کنید).

سایر مکانیسمهای نفوذ در شکل ۴-۷-۲ رسم شده‌اند. اگر تمام اتمها هم اندازه یا تقریباً هم اندازه باشند، مکانیسم تهیجای نقش عمده‌ای می‌یابد. تهیجایها می‌توانند قسمتی از ساختار معیوب باشند (شکل ۴-۲-۳) یا به علت تغییرات گرمایی وسیع به وجود آیند (مانند مثال ۴-۴-۳ که در آن آلومینیم درست ۱۵ درجه زیر نقطه ذوب خود بود).

نفوذ پذیری. وقتی اتمی به درون يك تهیجای برود، حفرة جدیدی باز می‌شود. به نوبه خود این جای باز شده نیز می‌تواند اتمی را از هر يك از محلهای همسایه دریافت کند. در نتیجه يك تهیجای در میان بلور «حرکت تصادفی» به وجود می‌آورد. همین مکانیسم حرکت تصادفی



(الف)



(ب)

شکل ۴-۷-۲ مکانیسمهای نفوذ. (الف) به وسیله تهیجای، (ب) به وسیله بین نشینی. تهیجایها در جهت عکس حرکت اتمهای نفوذ کننده حرکت می‌کنند (دفعه بعد حرکت حفرةهای الکترونی را بررسی خواهیم کرد). این حرکتها از نظر آماری «حرکت تصادفی» محسوب می‌شوند.

* در حدود ۳۴۰۰۰ کالری بر مول، $10^{-18} \times 24 \times 10^9$ ژول بر اتم، یا ۱۵ الکترون ولت بر اتم.

را می‌توان برای اتم کربن که در میان اتمهای آهن از يك بین‌نشینی به بین‌نشینی دیگری می‌رود نیز در نظر گرفت. با این حال اغلب به گرادیانهای غلظت برمی‌خوریم. مثلاً فرض کنید در نقطه (۱) به ازای هر ۲۵ سلول واحد آهن fcc يك اتم کربن وجود داشته باشد، و در نقطه (۲) که يك میلی‌متر دورتر قرار دارد به ازای هر ۳۵ سلول واحد تنها يك اتم کربن موجود باشد. حال، از آنجا که در هر نقطه حرکت تصادفی اتمهای کربن وجود دارد، شارخالصی را از حرکت اتمهای کربن از نقطه (۱) به نقطه (۲) خواهیم یافت زیرا به سادگی می‌توان گفت تعداد اتمهایی که در نزدیکی نقطه (۱) پرش می‌کنند نیم برابر بیشتر است (مثال ۴-۷-۱ را ببینید). این شارش خالص اتمها (یا مولکولها) نفوذ نام دارد.

شار J حرکت اتمها (که بر حسب اتم بر سانتی‌متر مربع، ثانیه بیان می‌شود) یا گرادیان غلظت $(C_2 - C_1)/(x_2 - x_1)$ متناسب است و به صورت رابطه ریاضی زیر بیان می‌شود

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (۴-۷-۱، الف)$$

ثابت تناسب D نفوذپذیری یا ضریب نفوذ نامیده می‌شود. علامت منفی نشان می‌دهد که شار در جهت سرازیری وجود دارد. واحدها عبارت‌اند از

$$\frac{\text{اتم}}{(\text{m}^2)(\text{sec})} = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{sec}} \right] \left[\frac{\text{اتم}/\text{m}^3}{\text{m}} \right] \quad (۴-۷-۱، ب)$$

نفوذپذیری به طبیعت اتمهای حل‌شونده، به طبیعت ساختار جامد، و به تغییرات دما بستگی دارد. در جدول ۴-۷-۱ چند مثال آورده شده است. بعضی از دلایل مربوط به مقادیر متفاوت جدول ۴-۷-۱ به‌قرار زیر است:

۱. دماهای بالاتر موجب نفوذپذیری بیشتری می‌شوند، زیرا اتمها انرژی گرمایی بیشتری دارند و در نتیجه احتمال بیشتری برای فعال‌شدن آنها و گذشتن از مانع انرژی بین اتمها (شکل ۴-۷-۱) وجود دارد.
۲. نفوذپذیری کربن در آهن در آهن بیشتر است زیرا اتم کربن کوچکتر است (پیوست ب).

* این رابطه قانون اول فیک نامیده می‌شود. قانون دوم فیک به صورت زیر است

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (۴-۷-۲)$$

که نشانه‌دهنده سرعت تغییر غلظت نسبت به زمان است. در حقیقت مقادیر $\partial C / \partial t$ و $\partial^2 C / \partial x^2$ به‌طور تجربی در آزمایشگاه تعیین شده‌اند و از آنها مقادیر D داده شده در جدول ۴-۷-۱ محاسبه شده است.

جدول ۴-۷-۱ نفوذپذیری اتمی*

نفوذپذیری، m^2/sec		حلال (ساختار اصلی)	جسم حل‌شدنی
$1000^\circ C$ ($1830^\circ F$)	$500^\circ C$ ($930^\circ F$)		
3×10^{-11}	$(5 \times 10^{-15})^{**}$	آهن fcc	۱. کربن
(2×10^{-9})	10^{-12}	آهن bcc	۲. کربن
2×10^{-16}	(2×10^{-23})	آهن fcc	۳. آهن
(3×10^{-14})	10^{-20}	آهن bcc	۴. آهن
2×10^{-16}	10^{-23}	آهن fcc	۵. نیکل
10^{-16}	(3×10^{-24})	آهن fcc	۶. منگنز
5×10^{-13}	2×10^{-18}	مس	۷. روی
$10^{-10} M^{***}$	4×10^{-14}	آلومینیم	۸. مس
2×10^{-13}	10^{-18}	مس	۹. مس
$10^{-12} M$	10^{-17}	نقره (بلور)	۱۰. نقره
—	10^{-11}	نقره (مرزدانه)	۱۱. نقره
(2×10^{-11})	3×10^{-16}	تیتانیم hcp	۱۲. کربن

* از روی داده‌های جدول ۴-۷-۲ محاسبه شده است.

** پراکنش‌ها نشان می‌دهند که فاز ناپایدار است.

*** اگرچه دما یا بالاتر از نقطه ذوب است ولی M محاسبه شده است.

۳. مس در آلومینیم راحت‌تر نفوذ می‌کند تا در خود مس زیرا پیوندهای Cu—Cu قویتر از پیوندهای Al—Al هستند (همچنان که از دمای ذوب آنها این نکته پیداست).
۴. آنها برای نفوذ در آهن bcc نفوذپذیری بیشتری دارند تا در آهن fcc، زیرا اولی ضریب فشردگی اتمی کمتری دارد (۸۶٫۸ در مقابل ۷۴٫۰)، بعداً خواهیم دید که ساختار fcc حفره‌های بین‌نشینی بزرگتری دارد ولی با این حال راه عبور بین حفره‌های آن کوچکتر از ساختار bcc است.
۵. نفوذ در امتداد مرزدانه‌ها سریعتر انجام می‌گیرد زیرا این، ناحیه عیوب بلوری است (شکل ۴-۷-۳).

نفوذپذیری بر حسب دما. در بخش ۴-۶ توزیع انرژی گرمایی را به دما مربوط کردیم. بولتسمان توانست این موضوع را با رابطه (۳-۶-۴) نشان دهد که در آن افزایش تعداد اتمهایی که بیشتر از حد معین انرژی دارند متناسب است با تابعی نمایی، که شامل این انرژی و عکس دماست. با نفوذ، انرژی فعالسازی برای حرکتی اتمی به انرژی E رابطه بولتسمان مربوط می‌شود. بنابراین

$$D = D_0 e^{-E/kT} \quad (۳-۷-۴)$$

که در آن D_0 ثابت تناسب و مستقل از دماست و M موجود در رابطه (۳-۶-۴) ب (ب) را در برمی‌گیرد. لگاریتم نفوذپذیری با عکس دما، $1/T$ ، متناسب است

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E}{kT} \quad (۴-۷-۴) \text{ (الف)}$$

حرف دیگر همان k ، ثابت بولتسمان رابطه (۳-۶-۴) است که مقدار آن $1.38 \times 10^{-24} \text{ J/atom} \cdot \text{K}$ بود.

در جدول ۲-۷-۲ مقادیر D_0 و انرژی فعالسازی تعدادی از واکنشهای نفوذ آلیاژ است. از آنجا که شیمیدانان واحدهای کالری و مولی را ترجیح می‌دهند، می‌توانیم رابطه بالا را به صورت زیر بازنویسی کنیم

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} \quad (۴-۷-۴) \text{ (ب)}$$

انرژی به صورت Q (کالری بر مول) بیان شده، ثابت R برابر $1.987 \text{ cal/mole} \cdot \text{K}$ است.

دوازده ردیف داده‌های جدولهای ۱-۷-۲ و ۲-۷-۲ در شکل ۳-۷-۴ ترسیم شده است. اینها نمودارهای نوع آرنیوس* است.

مثال ۱-۷-۴ در سطح قطعه‌ای آلومینیومی ۱۹ درصد اتمی مس و در 12 nm زیر سطح آن ۱۸ درصد اتمی مس وجود دارد. شار اتمهای مس از سطح به طرف داخل در 500°C چقدر است. (آلومینیوم fcc و $a = 0.4049 \text{ nm}$ است.)

حل:

$$\begin{aligned} \frac{\text{اتم}}{\text{mm}^2} &= \frac{4}{(0.4049 \times 10^{-6} \text{ mm})^2} \\ &= \frac{6 \times 10^{19}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

* توضیح بعد از مثال ۲-۶-۴ را ببینید.

جدول ۴-۷-۲ ثابتهای محاسبات نفوذپذیری

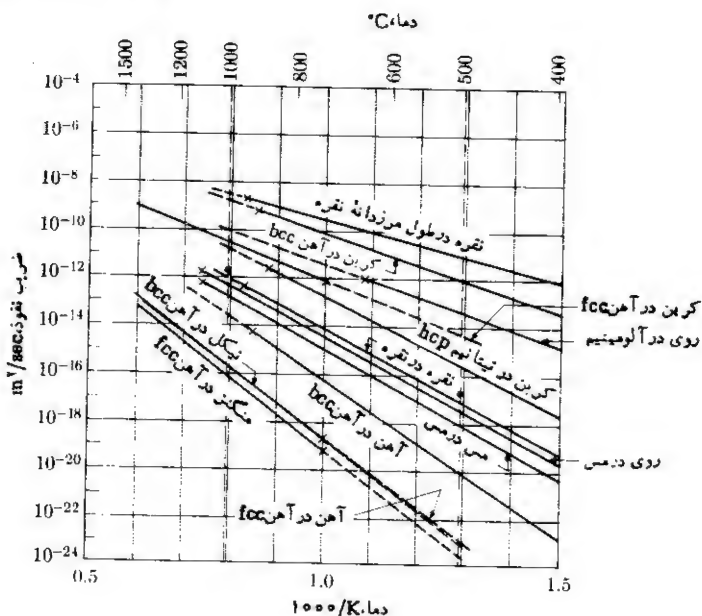
$$\left(\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} = \ln D_0 - \frac{E}{kT} \right)^*$$

E J/atom	Q cal/mole	D_0 m ² /sec	حلال (ساختار میزبان)	جسم حل‌شدنی
0.236×10^{-18}	۳۴۰۰۰	0.2×10^{-4}	آهن fcc	۱. کربن
0.204×10^{-18}	۲۹۳۰۰**	2.2×10^{-4}	آهن bcc	۲. کربن
0.445×10^{-18}	۶۴۰۰۰	0.22×10^{-4}	آهن fcc	۳. آهن
0.400×10^{-18}	۵۷۵۰۰	2.0×10^{-4}	آهن bcc	۴. آهن
0.465×10^{-18}	۶۷۰۰۰	0.77×10^{-4}	آهن fcc	۵. نیکل
0.269×10^{-18}	۶۷۵۰۰	0.35×10^{-4}	آهن fcc	۶. منگنز
0.317×10^{-18}	۴۵۶۰۰	0.34×10^{-4}	مس	۷. روی
0.210×10^{-18}	۳۰۲۰۰	0.15×10^{-4}	آلومینیم	۸. مس
0.327×10^{-18}	۴۷۱۰۰	0.2×10^{-4}	مس	۹. مس
0.306×10^{-18}	۴۴۱۰۰	0.4×10^{-4}	نقره (بلور)	۱۰. نقره
0.149×10^{-18}	۲۱۵۰۰	0.14×10^{-4}	نقره (مرزدانه)	۱۱. نقره
0.302×10^{-18}	۴۳۵۰۰	0.1×10^{-4}	تیتانیوم hcp	۱۲. کربن

$$k = 1.378 \times 10^{-24} \text{ J/atom} \cdot \text{K} ; R = 1.987 \text{ cal/mole} \cdot \text{K} *$$

** زیر ۴۰۰°C، کمتر است.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dC}{dx} \right)_{\text{Cu}} &= \frac{[(0.00018 - 0.00019)(6 \times 10^{19} / \text{mm}^3)]}{1.2 \text{ mm}} \\ &= -5 \times 10^{15} \text{ Cu/mm}^2 \end{aligned}$$



شکل ۳-۷-۴ نفوذپذیری بر حسب دما (جدولهای ۱-۷-۴ و ۲-۷-۴ را ببینید).

از جدول ۲-۷-۴ و رابطه (۳-۷-۴) نتیجه می‌گیریم که

$$\text{نفوذ} = (0.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}) \exp \left(\frac{-0.210 \times 10^{-18} \text{ J}}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/K})(773 \text{ K})} \right)$$

$$= \sim 4 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$\text{شار} = -(4 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{sec})(-5 \times 10^{15} \text{ Cu/mm}^3)(10^6 \text{ mm}^2/\text{m}^2)$$

$$= 2 \times 10^8 \text{ Cu/mm}^2 \cdot \text{sec}$$

توضیح. مقدار نفوذپذیری مس را نیز می‌توان از شکل ۳-۷-۴ (و برای 500°C ، از جدول ۱-۷-۴) به دست آورد. از آنجا که انرژی فعالسازی در توان رابطه مذکور وجود دارد، سه رقم با معنی آن در مقدار نفوذپذیری حفظ نمی‌شود. مقادیر نفوذپذیری معمولاً با يك یا دو رقم با معنی بیان می‌شوند.

مثال ۲-۷-۴ نفوذپذیری آلومینیم در مس در 500°C برابر $4.6 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{sec}$

و در 1000°C برابر $10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (الف) مقدار D_0 ، Q و E را برای زوج نفوذی معین کنید. ب) نفوذپذیری در 750°C چقدر است؟

حل: از رابطه (۴-۷-۴، الف)

$$\ln(2.76 \times 10^{-17}) = \ln D_0 - \frac{E}{13.78 \times 10^{-24} (773)} \quad (\text{الف})$$

$$\ln 1.76 \times 10^{-12} = \ln D_0 - \frac{E}{13.78 \times 10^{-24} (1273)}$$

با حل این دو معادله مقادیر زیر به دست می آید

$$D_0 = 4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$E = 0.73 \times 10^{-18} \text{ J/atom}$$

با حل رابطه (۴-۷-۴، ب)

$$Q = 43000 \text{ cal/mole}$$

ب) از رابطه (۴-۷-۴، الف)

$$\ln D = \ln 4 \times 10^{-5} - \frac{0.73 \times 10^{-18} \text{ J}}{(13.78 \times 10^{-24} \text{ J/K})(1023 \text{ K})}$$

نتیجه این

$$D = \sim 2.75 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{sec} \quad (\text{یا } 10^{-13.6} \text{ m}^2/\text{sec})$$

مقدار را می توان از شکل ۴-۷-۳ با قسرا دادن مقادیر معلوم (نقاط) روی نمودار آرمیوس و درون یابی به دست آورد. (ولی برای خواندن صحیح مقیاسهای غیر خطی باید دقت کرد.)

توضیح. دیده می شود که نفوذپذیری مس در آلومینیم بیشتر از آلومینیم در مس است. این موضوع را می توان از اطلاعات مربوط به استحکام پیوند فلزات میزبان نیز حدس زد.

$$(T_m \text{ آلومینیم}) > (T_m \text{ مس})$$

بنابراین

$$D_{\text{Al/Cu}} < D_{\text{Cu/Al}}$$

مثال ۳-۷-۴ فولادی حاوی ۸٫۵ درصد وزنی نیکل در مرکز x دانه آهن fcc و ۸٫۸ درصد وزنی نیکل در کناره e دانه است. این دو نقطه $40\text{ }\mu\text{m}$ از هم فاصله دارند. شار اتمی بین x و e در 1200°C چقدر است؟ ($a = 0.365\text{ nm}$)

حل: مبنا: 100 amu در x

$$\frac{(100\text{ amu})(0.085)}{58.71\text{ amu/Ni}} = 0.1448 = 8.1\text{ a/o Ni}$$

$$\frac{(100\text{ amu})(0.0915)}{55.85\text{ amu/Fe}} = 0.1638 = 9.19\text{ a/o Fe}$$

۱.۷۸۳

در e

$$\sim 8.4\text{ a/o Ni}$$

در هر سلول واحد

$$C_x = \frac{(4\text{ atoms})(0.081)}{(0.365 \times 10^{-9}\text{ m})^3} = 6.66 \times 10^{27}/\text{m}^3$$

$$C_e = \frac{(4\text{ atoms})(0.084)}{(0.365 \times 10^{-9}\text{ m})^3} = 6.91 \times 10^{27}/\text{m}^3$$

$$\ln D = \ln(0.77 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}) - \frac{0.365 \times 10^{-18}\text{ J}}{(13.8 \times 10^{-24}\text{ J/K})(1473\text{ K})}$$

$$D = 9 \times 10^{-15}\text{ m}^2/\text{sec}$$

$$\text{شار} = - \frac{(9 \times 10^{-15}\text{ m}^2/\text{s})(6.66 - 6.91)(10^{27}/\text{m}^3)}{40 \times 10^{-6}\text{ m}}$$

$$= 5.6 \times 10^{16}\text{ atoms}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

توضیح. باید به جای درصد وزنی با درصد اتمی کار کنیم زیرا شار مربوط به اتمهاست نه جرم. ▲

□ ۸-۴ فرایندهای نفوذ

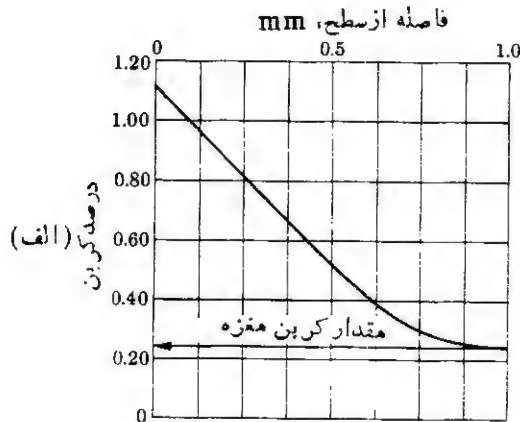
نفوذکار بردهای متعددی در فرایندهای فنی دارد. خواننده ممکن است با کربنی کردن فولاد

آشنا باشد. در این فرایند، فولاد کم کربن (که نسبتاً چقرمه ولی نرم است) در محیطی حاوی کربن گرم می‌شود، به طوری که کربن در فولاد نفوذ می‌کند و پوسته سخت و پر کربنی به وجود می‌آورد (شکل ۴-۸-۱). با نمونه دیگری از فرایندهای تجارتی نفوذ در ساخت نیم رساناها برخورد می‌کنیم. بور می‌تواند در سیلیسیم نفوذ کند و ناحیه نوع p را در وسایل پیوندی به وجود آورد (فصل ۵).

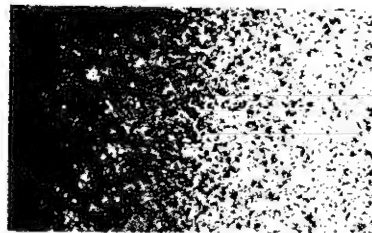
در اینجا در مورد جزئیات این فرایندها بحثی نخواهیم کرد ولی یادآوری می‌شود که باید نفوذ پذیری و زمان فرایند را به طور همزمان بررسی کرد. اگر طرفین رابطه (۴-۷-۱) را در زمان ضرب کنیم شار کل را به دست خواهیم آورد

$$(4-8-1) \quad D t \left(-\frac{dC}{dx} \right) = \text{اتم/cm}^2$$

بنابراین کل تعداد اتمهایی که از واحد سطح و با گرادیان غلظتی ثابتی وارد ماده شده یا



(ب)



شکل ۴-۸-۱ فولاد کربنی شده (سطح میل به در طرف چپ است). ابتدا در تمام این میل ۲۵ میلی متری، ۰.۲۴٪ کربن وجود داشت. فولاد در حضور کربن اضافی تا 870°C (1580°F) گرم شد تا کربن از سطح به داخل نفوذ کند. (ناحیه خنثی شده از کربن توسط حکاکی تیره شده است).

از آن خارج می‌شوند متناسب است با حاصل ضرب نفوذپذیری و زمان، Dt . این رابطه مناسبی است زیرا به ما امکان می‌دهد که زمان انجام فرایند را به صورت تابعی از دما برآورد کنیم. مثلاً فرض کنید پوسته کربنی شده‌ای به ضخامت 1.0 mm روی فولاد (آهن fcc) در مدت ۱۰۰ دقیقه، در 800°C تشکیل شده است و در آن نفوذپذیری تقریباً برابر $2.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ است. با همین گرادیان غلظتی در 1000°C فقط ۸ دقیقه طول می‌کشد زیرا نفوذپذیری ۱۲۵ برابر است (تقریباً $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{sec}$) از جدول (۷-۱-۲).

ضخامت پوسته با رابطه \sqrt{Dt} افزایش می‌یابد*

$$x \propto \sqrt{Dt} \quad (2-8-2)$$

از این رابطه و مثالهای پاراگراف قبل می‌توان گفت در مدت ۳۰ دقیقه در 1000°C پوسته‌ای به ضخامت تقریباً 1.9 mm تشکیل می‌شود

$$\frac{[(2.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})(6000 \text{ s})]^{1/2}}{1 \text{ mm}} = \frac{\sqrt{Dt}}{x}$$

$$\frac{\sqrt{Dt}}{x} = \frac{[(3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s})(1800 \text{ s})]^{1/2}}{\sim 1.9 \text{ mm}}$$

مثال ۴-۸-۱ در سطح میله‌ای فولادی به‌ازای هر ۲۰ سلول واحد آهن يك اتم کربن وجود دارد. يك میلی‌متر زیر سطح، به‌ازای هر ۳۰ سلول واحد يك اتم کربن وجود دارد. نفوذپذیری آن در 1000°C برابر $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{sec}$ است. ساختار جسم در 1000°C ، fcc است ($a = 0.365 \text{ nm}$). در هر دقیقه در هر سلول واحد چند اتم کربن نفوذ می‌کند؟

حل: غلظتهای کربن عبارت‌اند از

$$C_2 = \frac{1}{[30(0.365 \times 10^{-9} \text{ m})^3]}$$

$$= 0.68 \times 10^{27} / \text{m}^3$$

$$C_1 = \frac{1}{20(0.365 \times 10^{-9} \text{ m})^3}$$

$$= 1.03 \times 10^{27} / \text{m}^3$$

* این رابطه را می‌توان از قانون فیک رابطه (۴-۷-۲) در پانوش بخش قبل به‌دست آورد.

یا استفاده از رابطه (۴-۷-۱، الف)

$$J = - \frac{(3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{sec})(0.068 - 0.03)(10^{27}/\text{m}^3)}{(10^{-2} \text{ m})}$$

$$= 1.05 \times 10^{19} / \text{m}^2 \cdot \text{sec} \quad (\text{یا } \sim 10^{13} / \text{mm}^2 \cdot \text{sec})$$

هر سول واحد سطح مقطعی برابر $(0.0365 \times 10^{-9} \text{ m})^2$ دارد. در نتیجه

$$J_{u.c.} = (1.05 \times 10^{19} / \text{m}^2 \cdot \text{sec})(0.0365 \times 10^{-9} \text{ m})^2 (60 \text{ sec/min})$$

$$= 84 \text{ atoms/min}$$

توضیح. واضح است که قطعه فولادی ماده بی حرکتی نیست و در حقیقت تغییراتی درون آن اتفاق می افتد.

می توانیم از فرایند فوق برای کربن دادن به فولاد بهره جوییم. در فصل ۱۱ خواهیم دید که چگونه از این مزیت برای بهبود سختی سطح فولاد استفاده می شود. ▲

مثال ۴-۸-۲ نیکل رادیواکتیو به مدت ۲۰ دقیقه در 1200°C در سطح آهن نفوذ کرده است. حد تأثیر رادیواکتیو، محلی در ۱٫۵ میلی متری زیر سطح است. نمونه مشابهی به مدت یک ساعت در 1100°C گرم شده است. آیا حد تأثیر آن از ۱٫۵ میلی متری که در نمونه اول دیده می شود بیشتر است یا کمتر؟

حل: آهن در این دماها fcc است. از جدول ۴-۷-۲، رابطه (۴-۷-۳) یا (۴-۷-۴)، و رابطه (۴-۸-۴) داریم

$$D_{1200} = (0.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \exp \frac{(-67000 \text{ cal/mole})}{(1987 \text{ cal/mole} \cdot \text{K})(1473 \text{ K})}$$

$$= 9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$D_{1100} = 1.7 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$\frac{\sqrt{Dt}}{x} = \text{بر اساس } x \propto \sqrt{Dt} \quad \text{یا ثابت}$$

$$\left(\frac{\sqrt{(9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s})(1200 \text{ s})}}{1.5 \text{ mm}} \right)_{1200^\circ\text{C}}$$

$$= \left(\frac{\sqrt{(1.7 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s})(3600 \text{ s})}}{x} \right)_{1100^\circ\text{C}}$$

$$x = 1.1 \text{ mm} \quad (< 1.5 \text{ mm})$$

▲

مرور و بررسی مطالب

در فصل ۳ به دقت و نظم ساختار اتمی بلورها توجه شد. برای بسیاری از خواص و مشخصات مواد نظیر چگالی، ناهمسانگردی، صفحات لغزش، پایداری فاز، خاصیت پیزوالکتریکی، و ترکیبات نیمرسانا، بلورهای کامل به عنوان مبنا به کار می‌روند. در عین حال، بلورها همیشه کامل نیستند و خیلی از خواص مهم و رفتار مواد از بی‌نظمی آنها ناشی می‌شود. در چشم انداز این فصل بعضی از این مطالب را بیان کردیم. بی‌نظمی مواد را نیز باید همانند نظم آن در نظر داشته باشیم.

خلاصه

ناخالصیها در تمام مواد یافت می‌شوند، مگر اینکه با وسایل مخصوصی آنها را تا سطح پایینی کاهش داده باشیم. آلیاژ فلزی است با ناخالصیهایی که عمدتاً اضافه شده‌اند. محلولهای جامد شامل اتمها (یا مولکولها) بی از جزء دیگر تحت عنوان حل شونده‌اند. اینها ممکن است به صورت بین‌نشینی بین اتمهای حلال، یا به صورت جانشینی درون شبکه بلوری وجود داشته باشند. برای اینکه محلول جامد در بلور به وجود آید لازم است جسم حل شونده و حلال در اندازه و رفتار الکترونیکی قابل مقایسه باشند.

عیوب در تمام بلورها یافت می‌شود مگر اینکه با وسایل مخصوصی آنها را تا سطح پایینی کاهش داده باشیم. بهتر است آنها را از نظر هندسی طبقه‌بندی کنیم.

۱. عیوب نقطه‌ای، که شامل تهیجایها یا بین‌نشینیهاست؛
۲. عیوب خطی، که معمولاً نابجایی نامیده می‌شوند؛ و
۳. مرزها، که می‌توانند سطوح خارجی یا جدایی داخلی بین دانه‌ها یا فازها باشند.

اینها را می‌توان عیوب دو بعدی به حساب آورد. مایعات معمولاً نظم پدیده را که مشخصه بلورهاست ندارند. در بعضی از مواد می‌توان از بلوری شدن جلوگیری کرد و خاصیت بی‌شکلی مایع را در جامد نیز نگه داشت، (۱) به شرط آنکه ساختار بلوری پیش‌بینی شده پیچیده باشد؛ یا (۲) با سریع سرد کردن. این جامدات بی‌شکل را تحت عنوان شیشه نامگذاری می‌کنیم. حتی اگر دمای انجماد معین نباشد، مواد بی‌شکل دمایی تحت عنوان دمای شیشه‌ای، T_g دارند که هنگام مطالعه رفتار پلاستیکها اهمیت بسیار دارد.

فاذ به صورت قسمتی از ماده که به وسیله ساختار و یا ترکیب از دیگر قسمتها مجزا شده است، تعریف می‌شود.

در هر لحظه انرژی بیشتر اتمها یا مولکولها نزدیک به مقدار میانگین است. با این حال بعضی از آنها انرژی بسیار کم و بعضی دیگر انرژی فوق‌العاده زیادی خواهند داشت. بخشی از این توزیع آماری که مربوط به انرژی بالاست مورد توجه ماست، زیرا اتمها ممکن است آنقدر فعال شوند که پیوندها را بشکنند و در داخل ماده به محلهای جدیدی نفوذ کنند. تنها

از طریق این مکانیسم است که ساختار درونی (و در نتیجه خواص) ماده را می توان تغییر داد. در این حالات، نفوذ راحت تر رخ می دهد: (۱) در دماهای بالا؛ (۲) وقتی اتم نفوذکننده کوچک باشد (مثلاً کربن در آهن)؛ (۳) وقتی ضریب فشردگی ساختار میزبان پایین باشد (مثلاً bcc در مقابل fcc)؛ (۴) وقتی پیوندهای ساختار میزبان ضعیف باشند (مثلاً موادی که نقطه ذوب پایینی دارند)؛ و (۵) وقتی عیوبی در ماده باشد (مثلاً تهیجای یا مرزدانه).

سؤالات تشریحی

۱. تفاوت بین برنج و مفرغ چیست؟
۲. تفاوت بین آلیاژی را که مخلوط فازهاست با آلیاژی که محلول جامد است ذکر کنید.
۳. تفاوت بین حلال و جسم حل شدنی در محلولهای جامد چیست؟
۴. تفاوت بین محلولهای جامد بین نشینی و جانشینی چیست؟
۵. از پیوست (ب) عناصری را انتخاب کنید که برای محلول جامد جانشینی با آهن فلزی اندازه مناسبی دارند. یونهای را انتخاب کنید که می توانند جانشین یون Fe^{2+} شوند.
۶. برای اینکه محلول جامد منظم را یک ترکیب به حساب آوریم، دلیل خوبی وجود دارد. آن را شرح دهید.
۷. با وجود اینکه AlMg مانند FeO ناساستوکیومتری است ولی برخلاف FeO، تهیجای قابل توجهی ندارد. تفاوت را شرح دهید.
۸. چرا عیوب شانکی به صورت جفت جفت ظاهر می شوند؟
۹. منشأ انرژی سطحی و انرژی مرزدانه را شرح دهید.
۱۰. اثرات مختلف مرزدانه ها را روی رفتار مواد بنویسید.
۱۱. بزرگنمایی را همیشه بر اساس مضرب خطی نشان می دهند. برای بزرگنمایی ۱۰۰، مضرب سطحی چقدر است.
۱۲. عدد اندازه دانه ۵ در هاینچ مربع در مقطع دوبعدی — برابر عدد اندازه دانه ۴، دانه دارد. ابعاد خطی اولی — برابر بزرگتر است. سطح مرزدانه هر دانه — برابر است، ولی در واحد حجم — برابر می شود.
۱۳. تغییری را که در $380^{\circ}C$ در $AuCu_3$ به وجود می آید (مسئله ۴-۲-۶) با ذوب شدن مقایسه کنید.
۱۴. در حین انجماد آب چرا $(6 \text{ kJ/mole}$ یا $80 \text{ cal/g})$ انرژی حاصل می شود؟
۱۵. ضریب انبساط گرمایی حجمی مایع تقریباً همیشه بیشتر از جامد آن است. چرا؟
۱۶. دمای شیشه ای، T_g را برای کسی که این درس را نگرفته است شرح دهید.
۱۷. انرژی میانگین مولکولهای گاز در این اتاق بیشتر است یا انرژی میانه آنها؟ □
۱۸. بعد از مخلوط کردن ۱۰ گرم روغن با ۱۰۰ گرم آب چه فازهایی موجود است. با مخلوط کردن ۱۰ گرم نمک و ۱۰۰ گرم آب چطور؟ مثالی بیاورید که در آن «سیستم»

- مواد با سه فاز وجود داشته باشد.
۱۹. به شکل ۴-۴-۱ (د) مراجعه کنید. این عیب بیشتر از وجود یک اتم در محل مخصوصی در شبکه FCC، مثلاً در $1/2, 0, 0$ ، دیده می‌شود. دلیل آن را بنویسید.
۲۰. منظور از انرژی فعالسازی چیست؟ منظور از فاز چیست؟
۲۱. عبارت D_0 در رابطه (۴-۷-۳)، M موجود در رابطه (۴-۶-۳، ب) را شامل می‌شود، ولی برابر M نیست. دلیل آن را بنویسید.
۲۲. چرا T در روابط نوع آرنیوس دمای مطلق، K ، است؟ در محاسبات انبساط گرمایی و رسانندگی گرمایی می‌توان $^{\circ}C$ را به کار برد.
۲۳. با مراجعه به جدول ۴-۷-۱ بنویسید که چرا مقادیر ذکر شده برای جفت شماره ۲ بیشتر از جفت شماره ۱ است؟ برای جفت شماره ۲ بیشتر از شماره ۴؟ برای جفت شماره ۱۱ بیشتر از جفت شماره ۱۰؟ برای جفت شماره ۸ بیشتر از جفت شماره ۹؟
۲۴. سیالیت (عکس ویسکوزیته) طبق روابط نوع آرنیوس (روابط ۴-۶-۴ و ۴-۷-۴) با دما تغییر می‌کند. این خاصیت را با مکانیسم نفوذ مقایسه کنید.
۲۵. خود نفوذی، حرکت اتمها در ساختار خودشان است. شرح دهید که این امر چگونه اتفاق می‌افتد. با استفاده از ایزوتوپهای رادیواکتیو راهی پیشنهاد کنید که بدون وجود گرا دیان غلظتی بتوان آن را اندازه گرفت.
۲۶. در بعضی موارد نفوذ پذیری گرمایی h ، در محاسبات به جای رسانندگی گرمایی k به کار می‌رود. در اینجا $h = k/c\rho$. (عوامل موجود در مخرج، ظرفیت گرمایی، c ، $(J/g \cdot ^{\circ}C)$ و چگالی، ρ ، است) واحد h چیست؟ با استفاده از روابط (۴-۸-۱ و ۴-۸-۲) رابطه‌ای برای محاسبه انتقال گرما با استفاده از h به دست آورید. مثالی با استفاده از یکی از این روابط ذکر کنید.

مسائل

- ۴-۲-۱ آلیاژی شامل ۸۵ w/o مس و ۱۵ w/o قلع است. درصد اتمی (a/o) هر عنصر را محاسبه کنید.
- جواب: ۹۱٫۴ درصد اتمی Cu؛ ۸٫۶ درصد اتمی Sn
- ۴-۲-۲ ۵ a/o منیزیم در آلیاژ Al-Mg وجود دارد. درصد وزنی (w/o) منیزیم را حساب کنید.
- ۴-۲-۳ فرض کنید شکل ۴-۲-۳ محلول بین نشینی کربن در آهن fcc باشد. چند درصد وزنی کربن وجود دارد؟
- جواب: کربن ۱٫۳ w/o

۴-۲-۴ فرض کنید شکل ۱-۲-۲ محلول جامد جانشینی مس و طلا باشد. چند درصد وزنی Cu وجود دارد به شرط آنکه الف) اتم Cu فراگیرتر باشد؟ ب) اتم Au فراگیرتر باشد؟

۵-۲-۴ محلول جامد جانشینی کربن در آهن bcc حاوی یک کربن در ۵۰۰ سلول واحد است. درصد وزنی (w/o) کربن چقدر است؟

جواب: ۰.۰۲ w/o

۶-۲-۴ آلیاژی با ۲۵ a/o طلا و ۷۵ a/o مس محلول جامد fcc را تشکیل می‌دهد که بالای 380°C به صورت تصادفی است. زیر این دما منظم می‌شود و اتمهای طلا در گوشه‌های سلول واحد و اتمهای مس در مرکز هر وجه قرار می‌گیرند. الف) درصد وزنی طلا چقدر است. ب) کدامیک از شبکه‌های مکعبی در زیر 380°C موجودند.

۷-۲-۴ با مراجعه به مسئله (۴-۲-۶، الف) ثابت شبکه آن آلیاژ را تخمین بزنید؛ ب) چگالی آن را محاسبه کنید.

جواب: الف) $(1274 \text{ Mg/m}^3 =) 1274 \text{ g/cm}^3$ ب)

۸-۲-۴ سیلیسیم که به عنوان تیمرسانا به کار می‌رود در هر متر مکعب 10^{21} اتم آلومینیم دارد. الف) چند درصد وزنی Al وجود دارد؟ ب) به ازای هر اتم آلومینیم چند سلول واحد سیلیسیم وجود دارد؟ (Si مکعبی است و در هر سلول واحد ۸ اتم دارد؛ $a = 0.357 \text{ nm}$)

۹-۲-۴ آلیاژی شامل ۸۰ w/o Ni و ۲۰ w/o Cu و به صورت محلول جامد جانشینی fcc است. چگالی این آلیاژ را محاسبه کنید.

جواب: $(8992 \text{ Mg/m}^3 =) 8992 \text{ g/cm}^3$

۱۰-۳-۴ الف) درصد وزنی FeO در محلول جامد شکل ۱-۳-۴ چقدر است؟ ب) چند درصد وزنی Fe^{2+} ؟ ج) چند درصد وزنی O^{2-} موجود است؟

جواب: الف) ۵۱ w/o ب) ۳۹.۸ w/o ج) ۳۰.۸ w/o

۱۱-۳-۴ اگر تمام یونهای آهن شکل ۱-۳-۴ به یونهای Ni تبدیل شوند درصد وزنی MgO چقدر می‌شود؟

۱۲-۳-۴ اگر نسبت $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ برابر ۰.۱۴ باشد، چگالی $\text{Fe}_{0.9}\text{O}$ چقدر می‌شود؟ ساختار $\text{Fe}_{0.9}\text{O}$ نظیر NaCl و میانگین $(r_{\text{Fe}} + R_{\text{O}})$ برابر 0.215 nm است.

جواب: $(5773 \text{ Mg/m}^3 =) 5773 \text{ g/cm}^3$

۴-۳-۴ ترکیب بین فلزی از آلومینیم و منیزیم از $52\text{Mg}-48\text{Al}$ تا $56\text{Mg}-44\text{Al}$ (بر مبنای وزن) تغییر می‌کند. نسبت‌های اتمی این ترکیبات چقدر است؟

۴-۴-۱ شعاع بزرگترین اتمی را که می‌تواند به صورت بین‌نشین در آهن fcc بدون فشردن اتمها وجود داشته باشد محاسبه کنید. (دانه‌مایی: وجه (۱۰۰) چند سلول واحد مجاور را نیز رسم کنید.)

جواب: 0.53 nm

۴-۴-۲ شعاع بزرگترین اتمی را که می‌تواند به صورت بین‌نشینی و بدون فشردن اتمها در نقره fcc جای گیرد، تعیین کنید.

۴-۴-۳ شعاع بزرگترین اتمی را که می‌تواند به صورت بین‌نشینی و بدون فشردن اتمها، در آهن bcc جای گیرد تعیین کنید. (دانه‌مایی: مرکز بزرگترین حفره در نقطه $0, 1/4, 1/2$ قرار دارد.)

جواب: 0.36 nm

۴-۴-۴ الف) عدد کوئوردیناسیون مکان بین‌نشینی در مسئله ۴-۴-۱ چقدر است؟ ب) اگر هر یک از این مکانها توسط اتم یابون کوچکتری اشغال شود چه ساختاری به دست می‌آید؟

۴-۴-۵ الف) عدد کوئوردیناسیون مکان بین‌نشینی در مسئله ۴-۴-۳ چقدر است؟ ب) در هر سلول واحد چند مکان بین‌نشینی وجود دارد.

جواب: الف) ۴ ب) ۱۲

۴-۴-۶ در 1000°C ، در مس بین هر 473 مکان شبکه یک جای خالی وجود دارد. اگر وقتی که مس به 20°C می‌رسد این تهیجایها در آن باقی بمانند. چگالی مس چقدر خواهد بود؟

۴-۴-۷ تعداد تهیجایها در دمای بالا افزایش می‌یابد. بین 20°C و 1020°C ، ثابت شبکه فلز bcc به علت انبساط گرمایی $1/5$ افزایش می‌یابد. در همین گستره دما، چگالی 20% کاهش می‌یابد. فرض کنید در 20°C در هر 1000 سلول واحد یک تهیجای وجود داشته باشد، تخمین بزنید که در 1020°C در هر 1000 سلول واحد چه تعداد تهیجای وجود دارد.

جواب: ۱۱ در هر 1000 سلول واحد

۴-۴-۸ سطح مرزدانه در واحد حجم را برای آهن شکل ۹-۸-۲ الف) تخمین بزنید. بزرگنمایی 500 است.

۴-۴-۹ الف) فرض کنید عدد اندازه دانه ۶ شکل ۴-۲-۱۱ برشی دوبعدی از جامدی چند بلوری را نشان دهد. مساحت مرز دانه آن را تخمین بزنید؛ ب) مسئله را برای عدد اندازه دانه ۲ تکرار کنید.

جواب: الف) $60 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ (ب) $15 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$

۴-۴-۱۰ الف) در هر سانتی متر مربع چند عدد دانه در زیر میکروسکوپی (با بزرگنمایی $\times 100$) برای عدد اندازه دانه ۸ مشاهده می شود؟ ب) برای عدد اندازه دانه ۵ چطور؟ ج) این مسئله را برای $\times 200$ تکرار کنید.

۴-۴-۱۱ فرض کنید در شکل ۴-۴-۱۰ به جای $\times 250$ ، $\times 100$ باشد. الف) مساحت مرز دانه در هر mm^3 را تخمین بزنید؟ ب) عدد اندازه دانه را تخمین بزنید.

جواب: الف) $14 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ (ب) $350 \text{ in}^2/\text{in}^3$ (ج) کمی کمتر از ۳ #

۴-۴-۱۲ دانشجویی اندازه دانه ASTM فلزی را ۲ # به دست آورده است. ولی به اشتباه بزرگنمایی $\times 300$ را به جای بزرگنمایی $\times 100$ در نظر گرفته است. الف) عدد اندازه دانه صحیح چقدر است؟ ب) با مراجعه به شکل ۴-۸-۹ (الف) ASTM G. S. # چقدر است؟

۴-۵-۱۰ چگالی آلومینیم مایع در نقطه ذوب آن 237 Mg/m^3 است. ثابت اندازه دانه ای را در نظر بگیرید؛ ضریب فشردگی اتمی آن را محاسبه کنید.

جواب: ۰٫۶۵

۴-۵-۲ گرمای ذوب الف) سدیم؛ و ب) نقره را از جدول ۴-۵-۱۰ تخمین بزنید.

۴-۵-۳ بر اساس شیب منحنیهای شکل ۴-۵-۲، ضریب انبساط حجمی α_v را برای الف) سرب جامد؛ و ب) سرب مایع در نقطه ذوب سرب تخمین بزنید.

جواب: الف) $100 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (ب) $120 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

۴-۶-۱۰ سیعی آلومینیمی در 35°C بین دو گیره صلب کشیده شده، سپس تا 15°C سرد می شود. چه تنش به وجود می آید؟

جواب: 31 MPa

۴-۶-۲ به کمک داده های شکل ۴-۵-۲، ضریب انبساط خطی آهن bcc را در 900°C به دست آورید. جواب خود را با داده های جدول ۴-۳-۱ مقایسه کنید.

۴-۶-۴ کواردز (SiO_2) منشور شش بر است. مقدار میانگین ضرایب انبساط گرمایی آن برابر $\alpha_a = 15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ و $\alpha_c = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ است. درصد انبساط حجمی بلور کواردز بین 20°C و 570°C چقدر است؟

جواب: 2.2×10^5

□ ۴-۶-۴ جواب مسئله ۲-۵-۵ را رسم کنید. منحنی نقاط وسط دره انرژی را به صورت تابعی از انرژی رسم کنید. نتایج به دست آمده را به صورت کیفی به انبساط گرمایی مربوط کنید.

۵-۶-۴ با مراجعه به مثال ۴-۶-۲، در چه دمایی یکی از 10^8 اتم، انرژی کافی برای پریدن به خارج از محل خود را خواهد داشت؟

جواب: 1000K (727°C)

۶-۶-۴ با مراجعه به مثال ۴-۶-۲، چه کسری از اتمها در 1000°C انرژی کافی برای بیرون پریدن از محل خود را دارند؟

۷-۶-۴ در 800°C یکی از هر 10^{10} اتم و در 900°C یکی از هر 10^9 اتم انرژی مناسب برای حرکت در جامد را دارند. الف) انرژی فعالسازی بر حسب J/atom چقدر است؟ ب) بر حسب cal/mole چقدر است؟

جواب: J/atom $10^{-18} \times 0.4$ (یا 57600 cal/mole)

۸-۶-۴ با مراجعه به مسئله ۴-۶-۷، در چه دمایی از هر 10^8 اتم، يك اتم انرژی لازم را خواهد داشت؟

۹-۶-۴ در 500°C از هر 10^{12} اتم جسم حل شدنی یکی انرژی کافی برای تغییر مکان دارد. در 1600°C این کسر به یکی از هر 10^{10} اتم، افزایش می یابد. الف) انرژی فعالسازی (بر حسب J/atom و cal/mole) چقدر است؟ ب) در 700°C چه کسری، انرژی کافی برای تغییر مکان خواهد داشت؟

جواب: الف) J/atom $10^{-18} \times 0.43$ ، 61800 cal/mole (ب) 4×10^{-9}

۱۰-۶-۴ انرژی فعالسازی لازم برای ایجاد يك تهیجای در فلز برابر 2.0 eV (یا $10^{-18} \times 0.32$) است. در 800°C به ازای هر 10^4 اتم يك تهیجای وجود دارد. در چه دمایی به ازای هر 1000 اتم يك تهیجای وجود خواهد داشت؟

۱۱-۷-۴ محلول جامد مس در آلومینیم در نقطه X در هر m^3 ، 10^{26} اتم مس و در نقطه Y در هر m^3 ، 10^{24} اتم مس دارد. نقاط X و Y ، 10 میکرومتر از یکدیگر دورند. در 500°C شار نفوذ اتمهای مس از X به Y چقدر است؟

جواب: $4 \times 10^{17} \text{ atoms/m}^2 \cdot \text{sec}$

۱۲-۷-۴ الف) در 500°C نسبت نفوذ پذیری کربن در آهن bcc به کربن در آهن fcc

چقدر است؟ ب) در مورد نسبت کربن در آهن fcc به نیکل در آهن fcc در 1000°C چطور؟ ج) در مورد کربن در آهن fcc در 1000°C به کربن در آهن fcc در 500°C چطور؟ د) چرا نسبتها از يك بیشترند؟

۳-۷-۴ شار اتمهای کربن در آهن fcc به طرف داخل در 1000°C برابر $10^{19}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ است. گرادیان غلظتی آن چقدر است؟

جواب: $33 \times 10^{29}/\text{m}^4$

۴-۷-۴ در سطح آهن مسئله ۳-۷-۴، a/o کربن وجود دارد. درصد اتمی کربن در يك میلی متری زیر سطح چقدر است؟ (در 1000°C ، $a = 0.365 \text{ nm}$)

۵-۷-۴ الف) با استفاده از داده های جدول ۲-۷-۴، نفوذ پذیری مس را در آلومینیم، در 400°C محاسبه کنید؛ ب) صحت جواب خود را با شکل ۳-۷-۴ امتحان کنید.

جواب: $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{sec}$

۶-۷-۴ روی به داخل مس می رود. در نقطه X ، $\text{Zn}/\text{mm}^3 \times 10^{17}$ در 25 وجود دارد. در نقطه Y (در 2 میلی متری X) چه غلظتی لازم است تا در 300°C ، $60/\text{mm}^2 \cdot \text{min}$ اتم Zn نفوذ کند.

۷-۷-۴ درصد وزنی روی در مس در نقطه X مسئله ۶-۷-۴ چقدر است؟

جواب: 0.3 w/o

۸-۷-۴ گرادیان روی در آلیاژی از مس ۱۰ مرتبه بیشتر از گرادیان آلومینیم در آلیاژ دیگری از مس است. در 500°C شار اتمهای حل شونده از هر m^2 در هر ثانیه را در دو آلیاژ مقایسه کنید. (داده های مربوط به نفوذ پذیری Al در Cu در مثال ۲-۷-۴ آمده است.)

۹-۷-۴ با مراجعه به مسئله ۱-۷-۴، الف) ضریب نفوذ مس در آلومینیم در 100°C چقدر است؟ ب) شار نفوذ اتمهای مس از X به Y در 100°C چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) $3 \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{sec}$ ب) $300 \text{ atoms}/\text{mm}^2 \cdot \text{sec}$

۱۰-۷-۴ آلومینیم می خواهد به درون تکه بلوری از سیلیسیم نفوذ کند. درجه دمایی ضریب نفوذ برابر $10^{-14} \text{ m}^2/\text{sec}$ خواهد بود؟ $Q = 73000 \text{ cal/mole}$ و $(D_0 = 1.55 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec})$.

۱۱-۷-۴ منحنیهای نیکل در آهن fcc و آهن در آهن fcc شکل ۳-۷-۴ یکدیگر را قطع می کنند. الف) از طریق محاسبه، دمای نقطه تقاطع آنها را معین کنید؛ ب) چرا

دو منحنی تقریباً منطبق اند؟

جواب: الف) $1200\text{K} \sim (900^\circ\text{C})$ ؛ جواب دقیق‌تر لازم نیست.

۴-۷-۱۲ نفوذ کربن در تنگستن دارای انرژی فعالسازی $[10^{-18} \times 5.78 \text{ J/atom}]$ و D_0 برابر $2.75 \text{ m}^2/\text{sec}$ است. منحنی نفوذپذیری در شکل ۴-۷-۳ در کجا واقع می‌شود؟ در مقایسه با سایر منحنیهای نفوذ کربن، چرا در این محل قرار می‌گیرد؟

۴-۷-۱۳ گرا دیان غلظت نیکل در آهن چقدر باید باشد تا شاری برابر $100/\text{mm}^2 \cdot \text{sec}$ اتم نیکل (الف) در 1000°C ؛ ب) در 1400°C ایجاد شود؟

جواب: الف) $(5 \times 10^{22}/\text{m}^3)/\text{m}$ — ب) $(7 \times 10^{20}/\text{m}^3)/\text{m}$

۴-۷-۱۴ نفوذپذیری آهن (fcc)، مس و نقره را در ۶۰٪ نقطه ذوب آنها، $0.06 T_m$ ، مقایسه کنید.

□ ۴-۸-۱ پسته کربنی شده فولادی (آهن fcc) در مدت یک ساعت در 820°C (1510°F) به دست آمده است. چه مدتی طول می‌کشد تا در همین دما، ضخامت پسته دو برابر شود.

جواب: ۴ ساعت

□ ۴-۸-۲ پسته کربنی شده فولادی (آهن fcc) در مدت یک ساعت در 820°C (1510°F) به دست آمده است. چه مدتی طول می‌کشد تا در 850°C (1560°F) همین ضخامت را به دست آورد؟

□ ۴-۸-۳ با مراجعه به مسئله ۴-۸-۱، الف) چه دمای لازم است تا ضخامت در مدت یک ساعت دو برابر شود؟ ب) در دو ساعت چطور؟

جواب: الف) 1200K (927°C) ب) 1144K (871°C)

□ ۴-۸-۴ با مراجعه به مثال ۴-۸-۱، در 850°C چه تعداد از اتمها در هر دقیقه از میان هر سلول واحد نفوذ می‌کنند؟



حرکت الکترون در جامدات*

چشم‌انداز فصل

تا اینجا اتمها و آرایش آنها را مطالعه کردیم؛ و اکنون در این فصل الکترون‌ها و چگونگی حرکت آنها را در میان اتمها بررسی می‌کنیم. فلزات به دلیل پیوند ضعیفی که در الکترونهای ظرفیتی دارند رسانای خوبی از نظر الکتریسیته و گرمايند. این «رسانندگی» از آنجا ناشی می‌شود که برای تحريك و تغيير مكان الکترونهای ظرفیتی و رسیدن به ترازهای رسانش، انرژی اندکی کافی است. به عکس، در عایقها الکترون‌ها باید از شکاف انرژی بگذرند. از طرفی نیمرساناها شکاف انرژی کوچکی دارند در نتیجه تعداد مناسبی الکترون برای رسانش در دسترس است. پس از آشنایی با شکافهای انرژی و پیوندگاهها، تصور کلی و ساده‌ای در مورد بسیاری از وسایل امکانپذیر است.

* در صورت دلخواه مدرس می‌تواند این فصل را بعداً با کمترین تغییر در میان فصلهای دیگر، تدریس کند. ولی با در نظر گرفتن نقشی که مواد الکترونی در اجتماع ما دارد لازم است که این فصل حتماً تدریس شود.

هدف از مطالعه

۱. انجام محاسبات ساده برای رسانندگی براساس مفهوم الکترون به عنوان حامل بار منفی، و از طرف دیگر الکترون کم شده که حفره الکترونی نامیده می شود و حامل بار مثبت است.

۲. ارتباط دادن تغییرات مقاومت ویژه (و رسانندگی) به اثر ناهمبندیها و تغییرات دما توسط میانگین مسیر آزاد. (بدین وسیله می توان اثر کار سرد را روی مقاومت ویژه در فصل ۶ بر آورد کرد).

۳. مربوط کردن باندهای انرژی و شکافهای انرژی از نظر کیفی به رسانندگی فلزات، نیم رسانا و عایقها.

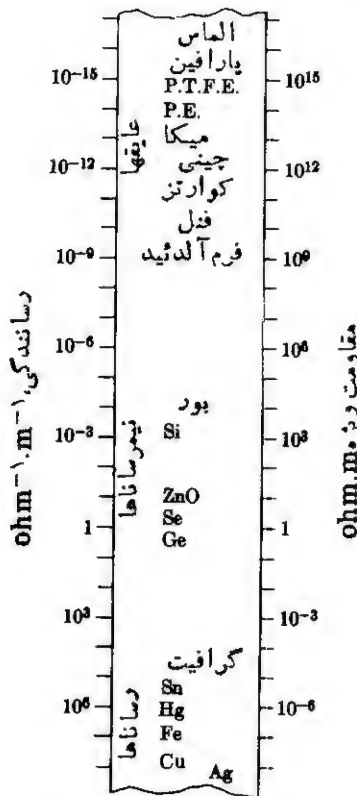
۴. حل مسائل مقدماتی الف) در مورد رسانندگی نیم رساناهای ذاتی براساس تحرك بار و اندازه شکاف انرژی آنها؛ ب) در مورد رسانندگی نیم رساناهای خارجی براساس افزودن ناخالصی پیش بینی شده؛ و ج) در مورد پیروی باز ترکیب براساس زمان توقف.

۵. درک اصول وسایل ساخته شده از نیم رساناها، مثل ترمیستور، رسانای نوری، L. E. D.، و یکسو کننده پیوندی.

۶. آشنایی کافی با واژه هایی که در مواد الکترونی به کار رفته است، تا در صورت لزوم با مهندسان طراح ارتباط برقرار شود.
اگر مطالعه بخشهای ۱-۳ و ۱-۴ را به بعد موکول کرده اید، اکنون به آنها مراجعه کنید. بار الکترونی در این بخش کاربرد زیادی دارد، بنابراین پیشنهاد می شود مقدار آن را یاد بگیرید ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$). رابطه آرنیوس فصل ۴ در این فصل نیز آمده است.

۱-۵ حاملهای بار الکتریکی

مواد مختلفی که توسط مهندسان و دانشوران به کار می روند گستره وسیعی از رسانندگی (یا چون $\sigma = 1/\rho$)، مقاومت ویژه را می پوشانند. طبق شکل ۱-۵ این مواد معمولاً به سه دسته تقسیم می شوند: رساناها، نیم رساناها، و عایقها. در این دسته بندی فلزات که الکترون آزاد و متحرك دارند در گروه نخست قرار می گیرند (بخشهای ۲-۲ و ۲-۳). مواد سرمایی و پلی مری که الکترونها آنها محکم نگه داشته شده است و یونها آنها نمی توانند نفوذ کنند، در دسته عایقها قرار گرفته اند. تاچندی پیش فقط دواتهای طیف شکل ۱-۵ را مفید می دانستند ولی گروه سوم یعنی نیم رساناها که بعداً شناخته شدند اهمیت روزافزونی پیدا کرده اند و در واقع بحث اصلی این فصل را تشکیل می دهند.



شکل ۱-۱-۵ طیف رسانندگی (و مقاومت ویژه). نیم رساناهای متداول بین 10^4 تا $10^{-16} \Omega^{-1}.m^{-1}$ قرار دارند.

در آن نوع از مواد که رسانای الکتریسته‌اند بار الکتریکی به صورت مضربی از $10^{-18} \times 16$ ره کولن، که بار يك الكترون است حمل می‌شود. در فلزات، الکترونهايند که به طور جداگانه حرکت می‌کنند. در مواد یونی بار الکتریکی به وسیله یونهای نفوذکننده حمل می‌شود. ولی مقدار بار برابر با مضرب صحیحی از بار الکترون است (برای آنیونها منفی و برای کاتیونها مثبت). بنا بر این هریون SO_4^{2-} در باتری باری معادل $10^{-18} \times 32$ ره کولن را حمل می‌کند، و هریون Pb^{2+} باری معادل دو الکترون، کم دارد و در جهت مخالف حرکت می‌کند.

الکترونها و آنیونها حامل بار منفی‌اند. در مقابل، کاتیونها مانند Pb^{2+} حامل بار مثبت به شمار می‌آیند زیرا در آنها کمبود الکترون وجود دارد. نوع دیگری حامل بار مثبت وجود دارد که در تیمرساناها اهمیت بسیار دارد، این حامل بار مثبت، حفره الکترونی نام دارد که در واقع جای خالی شده الکترون تغییر مکان یافته در رساند انرژی است. این مطلب در بخش ۴-۵ نیز مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مقادیر رسانندگی σ و مقاومت ویژه ρ برای هر ماده، به تعداد حاملهای بار n ، و بار هریک از حاملها q و تحرک آنها μ طبق رابطه (۱-۴-۱)، الف) بستگی دارد

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = nq\mu \quad (1-1-5)$$

مانند فصل ۱، واحدهای n ، q و μ به ترتیب m^{-3} ، کولن، و $m^2/V.s$ است.* در این فصل عوامل اتمی و ساختاری را که روی مقادیر n و μ مؤثرند بررسی خواهیم کرد تا بتوانیم عواملی را پیش بینی کنیم که در انتخاب مواد برای طراحی یا رفتار ضمن کار مؤثرند.

سرعت دانشی، \bar{v} ، حامل بار را می توان از رابطه (۱-۴-۲) به دست آورد

$$\bar{v} = \mu \mathcal{E} \quad (2-1-5)$$

یادآور می شود که سرعت رانش به میدان الکتریکی \mathcal{E} بسا V/m بستگی دارد. بنابراین اگر اختلاف پتانسیلی وجود نداشته باشد سرعت منتهی به سرعت رانش وجود نخواهد داشت. این امر بدان معنی نیست که ذرات باردار حرکت نمی کنند، بلکه حرکات تصادفی اند و بنابراین حاملهای بار در یک جهت، با بار حمل شونده در جهت مخالف متوازن می شوند.

مثال ۱-۱-۵ مقاومت ویژه نوعی نیم رسانا که در هر متر مکعب 10^{21} حامل بار دارد در $20^\circ C$ برابر با $1 \Omega \cdot m$ است. اگر در گرایان $15 V/mm$ یک آمپر جریان حمل شود سرعت رانش الکترونها چقدر است؟

حل: با استفاده از روابط (۱-۱-۵) و (۲-۱-۵)

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \mathcal{E} / \rho n q \\ &= \frac{(150 V/m)}{(0.01 \Omega \cdot m)(10^{21}/m^3)(0.16 \times 10^{-18} \text{ amp} \cdot \text{sec})} = 94 \text{ m/sec} \end{aligned} \quad (3-1-5)$$

توضیح. از روابط (۲-۴-۱) و (۲-۱-۵) درمی یابیم که تحرک حاملهای بار در این ماده طبق روابط (۲-۴-۱) و (۲-۱-۵)، $(m/sec)(V/m)$ خواهد بود. 0.0625

* اگر بخش ۴-۱ را قبلاً مطالعه نکرده اید، اکنون توصیه می شود به عنوان مرور خواص مقدماتی الکتریکی به آن مراجعه کنید.

۵-۲ رسانندگی فلزی

در بخش ۲-۲ پیوند فلزی را بر اساس الکترونهاي آزاد شرح دادیم. به ویژه الکترونهاي ظرفيتی می توانند مانند امواج ساکن آزادانه در فلز حرکت کنند. بنا بر این بدون وجود میدان الکتریکی، انتقال بار منتهی به وجود نخواهد داشت.

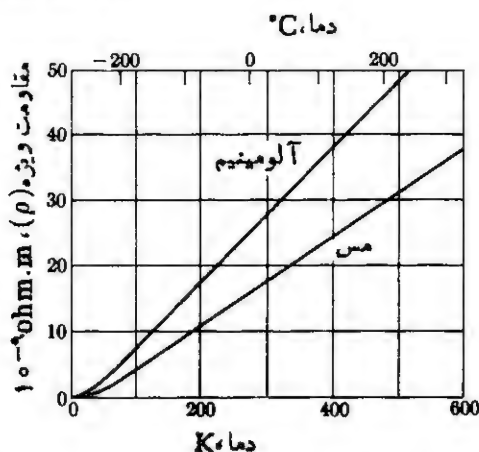
اگر فلز در مدار الکتریکی قرار گیرد، الکترونها به طرف الکتروود مثبت می روند و با کسب انرژی بیشتری، در آن جهت سرعت می گیرند. به عکس، الکترونهاي که به طرف الکتروود منفی می روند انرژی و سرعت خود را کاهشی می دهند. در نتیجه سرعت رانش موجود در رابطه (۵-۱-۲) به وجود می آید.

میانگین مسیر آزاد. امواج بدون توقف از میان ساختارهای متناوب حرکت می کنند. بلور منظم (فصل ۳) یکی از معمولترین ساختارهای متناوب موجود است. بنا بر این شبکه های بلوری فلزات، محیط کاملاً مناسبی برای حرکت الکترونها محسوب می شود. با این حال هر نوع بی نظمی در ساختارهای تکرار شونده ای که موج از میان آنها عبور می کند می تواند موج متحرک را منحرف کند. به این ترتیب هرگاه الکترونی که به طرف الکتروود مثبت در حرکت است منحرف شود، از آن پس در آن جهت دیگر سرعت افزایش نخواهد یافت. نتیجه امر، کاهش سرعت رانش است حتی اگر میدان الکتریکی تغییر نکرده باشد. به طور خلاصه باید گفت بی نظمیهایی شبکه بلوری تحرك را در رابطه (۵-۱-۲) کاهش می دهند؛ در نتیجه رسانندگی کم و مقاومت ویژه زیاد می شود.

میانگین فاصله ای را که الکترون در حرکت مسوچی بدون انحراف طی می کند میانگین مسیر آزاد گویند. برای آنکه روشن شود که چرا فلزات مقاومت ویژه یکسان ندارند باید بی نظمیهایی که حرکت الکترونی را منحرف می کنند شناخته شوند. با توجه به فصل ۴ دوائر قابل تشخیص است.

مقاومت ویژه بر حسب دما. مقاومت ویژه فلزات با دما افزایش می یابد (شکل ۵-۲-۱) و این افزایش (بجز در صفر مطلق و نزدیک آن) تقریباً خطی است. از آنجایی که در فلزات* دلیلی در دست نیست که در رابطه (۵-۱-۱)، با افزایش دما n کاهش یابد، باید به تحرك μ توجه کرد. افزایش مقدار ارتعاشات گرمایی با افزایش دما متناسب است (بجز در دماهای بسیار پایین) و موجب کم کردن نظم بلور و کاهش میانگین مسیر آزاد می شود که در نتیجه تحرك الکترونها در فلز کم خواهد شد. تغییر مقاومت ویژه حاصل هنگام طرح ابزار الکتریکی بسیار مهم است، در برخی موارد برای اجتناب از حساسیت ناخواسته مدار نسبت بدما باید مراقبتهایی انجام شود. در موارد دیگر، این حساسیت بدما را می توان به عنوان يك «تومز» مفید به کار برد. مثال ۵-۲-۳ این پدیده را در يك وسیله الکتریکی (برشته کننده

* در ترمزها با زیاد شدن دما تعداد حاملهای بار افزایش می یابد (بخش ۵-۴).



شکل ۱-۲-۵ مقاومت ویژه بر حسب دما (در فلزات). در شرایط عادی، مقاومت ویژه فلزات با تغییر دما به طور خطی تغییر می کند.

نان) مشخص می کند.

با استفاده از ضریب گرمایی مقاومت y_T می توان مقاومت ویژه را بر حسب دما به صورت زیر بیان کرد

$$\rho_T = \rho_{0^\circ\text{C}}(1 + y_T \Delta T) \quad (1-2-5)^*$$

در این رابطه $\rho_{0^\circ\text{C}}$ مقاومت ویژه در صفر درجه سانتی گراد و ΔT برابر $(T - 0^\circ\text{C})$ است. مقدار ضریب گرمایی مقاومت برای فلزات خالص حدود $0.4\% \text{ per } 1^\circ\text{C}$ است (جدول ۱-۲-۵). این مقدار نشان می دهد که میانگین مسیر آزاد الکترونها بین صفر تا 250°C ، نصف می شود.

مقاومت ویژه در محلولهای جامد. عامل دیگری که می تواند میانگین مسیر آزاد را در فلزات کاهش دهد وجود اتمهای جسم حل شدنی در شبکه است، مقاومت ویژه محلول جامد آلیاژی همواره از فلزات خالص سازنده آن بیشتر است.**

دلیل این امر آن است که الکترون هنگام نزدیک شدن به این ناخالصی اتمی با نوبی بی نظمی در میدان الکتریکی مواجه می شود. در درجه اول در آلیاژی مثل برنج شبکه بلوری اندکی اعوجاج دارد زیرا شعاع اتمهای مس و روی چند درصد باهم اختلاف دارند، به علاوه مس ۲۹ پروتون و روی ۳۰ پروتون دارد. این نیز میدان موضعی را تحت تأثیر

* کاهش مقاومت ویژه (افزایش رسانندگی) مورد بحث به اهر رسانندگی که در نزدیکی صفر مطلق ظاهر می شود، مربوط نمی شود. آن شامل پدیده دیگری (مکانیک کوانتومی) است که در محدوده این کتاب نیست.

** داده ها را برای فلزات و آلیاژها در جدول ۱-۲-۵ یا پیوست (ج) بررسی کنید.

جدول ۵-۲-۱ ضرایب گرمایی مقاومت ویژه

فلز	مقاومت ویژه در $^{\circ}\text{C}^{\circ}$ ohm·nm	ضریب گرمایی مقاومت ویژه، γ_T ، $^{\circ}\text{C}^{-1}$
آلومینیم	۲۷	۰٫۰۰۰۳۹
مس	۱۶	۰٫۰۰۰۳۹
طلا	۲۳	۰٫۰۰۰۳۴
آهن	۹۰	۰٫۰۰۰۴۵
سرب	۱۹۰	۰٫۰۰۰۳۹
منیزیم	۲۲	۰٫۰۰۰۴
تیکل	۶۹	۰٫۰۰۰۶
نقره	۱۵	۰٫۰۰۰۳۸
تنگستن	۵۰	۰٫۰۰۰۴۵
روی	۵۳	۰٫۰۰۰۳۷
برنج (Cu-Zn)	~ ۶۰	۰٫۰۰۰۲
مفرغ (Cu-Sn)	~ ۱۰۰	۰٫۰۰۰۱
کنستانان (Cu-Ni)	~ ۵۰۰	۰٫۰۰۰۰۰۱
مونل (Ni-Cu)	~ ۲۵۰	۰٫۰۰۰۲
نیکروم (Ni-Cr)	~ ۱۰۰۰	۰٫۰۰۰۰۴

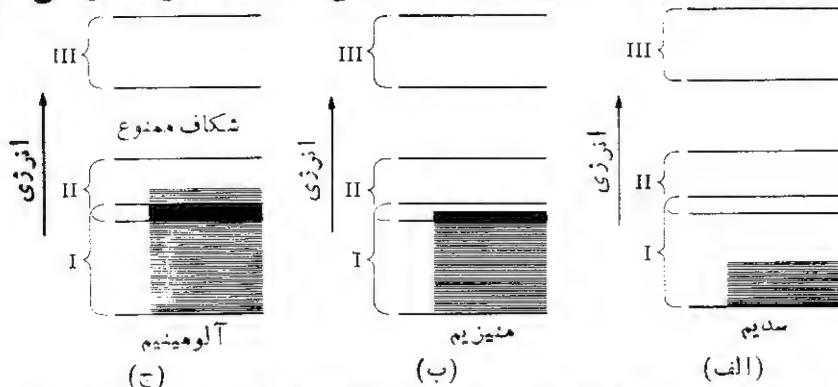
* داده‌های مربوط به فلزات و آلیاژها را در جدول ۵-۲-۱ یا پیوست (ج) بررسی کنید.

قرار می‌دهد. با وجود آنکه این اختلافات به نظر جزئی می‌آیند، الکترون‌ها را منحرف می‌کنند و میانگین مسیر آزاد را کاهش می‌دهند. از آنجا که مقاومت ویژه برنج ($70\text{Cu}-30\text{Zn}$) سه تا چهار برابر مس خالص است می‌توان گفت میانگین مسیر آزاد برای الکترون‌ها در برنج ۲۵ تا ۳۰٪ مس خالص است. بنابراین در طرح‌هایی که کاهش ضریب ویژه اشکال دارد به ناچار باید از فلزات خالص استفاده کرد (بخش ۱-۶).

باند های انرژی. از (شکل ۲-۲-۷) به یسار بیاورید که الکترون های ان های تکی فقط اربیتال یا تراز انرژی مشخصی را اشغال می کنند و بین این ترازاها شکاف های انرژی ممنوعی وجود دارند. اطراف هر اتم، الکترون ها امواج ساکن پدید می آورند و این الگو برای الکترون های داخلی یا غیر ظرفیتی نیز صادق است، با این تفاوت که الکترون های آخرین مدار یا ظرفیتی هنگامی که تعداد زیادی اتم کوئوردینانس شده داشته باشیم، ازجمله می شوند. بنابراین اربیتال های ظرفیتی، يك باند تشکیل می دهند [شکل ۲-۲-۷ (ب)] و موج ساکن تحت تأثیر تمام اتم های موجود خواهد بود. در نتیجه هر باند تعداد زیادی ترازا های انرژی جدا از هم را شامل می شود که تعداد این ترازاها برابر با تعداد اتم های موجود در سیستم خواهد بود. چون تعداد آنها فوق العاده زیاد است و باندهای انرژی تنها چند الکترون ولت پهنا دارند می توان گفت ترازا های انرژی در هر باند به فواصل بینهایت کوچک از هم قرار گرفته اند به طوری که باند انرژی پیوسته فرض می شود.

بنابر يك اصل فیزیکی*، تنها دو الکترون می توانند در يك تراز انرژی باشند (و این دو نیز باید چرخش مغناطیسی عکس هم داشته باشند). بنابراین با این تعداد ترازاها، هر باند می تواند دو برابر تعداد اتم های موجود، الکترون در برگیرد. در نتیجه در فلزات يك ظرفیتی مثل سدیم تنها نصف باند ظرفیتی پرمی شود [شکل ۲-۲-۵ (الف)]. از آنجا که آلومینیم در هر اتم سه الکترون ظرفیتی دارد، باند ظرفیتی اول آن پر و باند دوم نیمه پر است [شکل ۲-۲-۵ (ج)]. طبیعی است در هر باند ابتدا ترازا های انرژی پایینتر پرمی شوند.

تصریف رسانای فلزی. در بخش ۲-۷ گفته شد که یکی از مشخصات فلزات «توانایی آنها



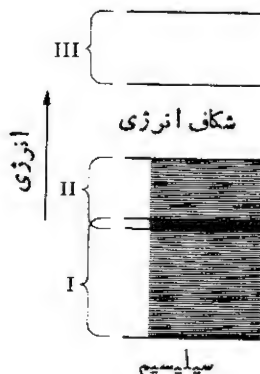
شکل ۲-۲-۵ باندهای انرژی. (الف) سدیم. با يك الکترون ظرفیتی در هر اتم، تنها نیمی از باند ظرفیتی آن پرمی شود (I)؛ (ب) منیزیم. باند اول آن پرمی شود، بجز آنکه باند دوم (II) همپوشانی داشته باند تا تعدادی الکترون را در برگیرد (ج) آلومینیم. با سه الکترون ظرفیتی، نخستین باند را پر و دومی را نیمه پرمی کند. تمام این فلزات در قسمت بالایی باندهای ظرفیتی خود، ترازا های خالی دارند.

برای از دست دادن الکترون ظرفیتی است و ذکر شد که به همین دلیل فلزات رسانانده اکنون به تعریف بهتری از رساناهای فلزی می‌پردازیم که عبارت است از داشتن باندهای ظرفیتی پر نشده. شکلهای ۲-۲-۵ (الف) و (ج) طرحواره این مطلب را برای سدیم و آلومینیم نشان می‌دهند.

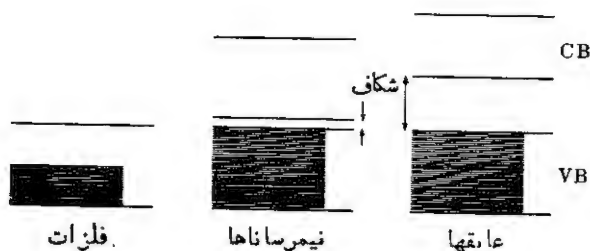
ترازهای انرژی خالی در یک باند به این دلیل برای رسانش اهمیت دارند که در هنگام حرکت الکترون به سمت الکتروود مثبت انتقال آن را به تراز بالاتر میسر می‌سازند. اگر باند انرژی کاملاً پر شده باشد و شکاف انرژی ممنوع موجود باشد این امر امکان نخواهد داشت.

در مورد نیزیم که در هراتم دو الکترون ظرفیتی دارد انتظار می‌رود که نخستین باند ظرفیتی پر شده باشد. همین حالت وجود دارد، ولی باندهای اول و دوم همپوشانی دارند [شکل ۲-۲-۵ (ب)]. بنابراین بعضی از الکترونهای $2N$ (که در آن N تعداد اتمهاست) در باند دوم نیز قرار می‌گیرند به طوری که تعدادی در تراز خالی می‌مانند تا الکترونهای شتابدار را دریافت کنند. در نتیجه نیزیم خاصیت فلزی دارد.

اما سیلیسیم در هراتم چهار الکترون ظرفیتی دارد که دو باند ظرفیتی اول را کاملاً پر می‌کنند (شکل ۲-۲-۳) به علاوه چون بالای باند دوم شکاف انرژی ممنوع وجود دارد الکترونها نمی‌توانند به باند بعدی صعود کنند و شکاف بزرگی در زیر تراز انرژی سومین باند (III) وجود دارد. سیلیسیم رسانای فلزی محسوب نمی‌شود (در 25°C مقاومت ویژه مس $1.7 \times 10^{-9} \text{ ohm} \cdot \text{m}$ و مقاومت ویژه سیلیسیم $2 \times 10^3 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ نسبتی حدود 10^{11} دارد). در دو بخش بعد خواهیم دید که تفاوت عایقها و نیم رساناها مربوط به اندازه شکاف انرژی، E_g ، است که بین باندهای ظرفیتی پر شده واقع است (شکل ۲-۲-۴). سیلیسیم یک نیم رساناست (شکل ۱-۱-۵)؛ زیرا اندازه شکاف انرژی در آن چنان است



شکل ۲-۲-۳ شکاف انرژی (در سیلیسیم). چهار الکترون ظرفیتی در اتم سیلیسیم دو باند نخست انرژی را پر می‌کنند. بین باندهای دوم و سوم شکاف ممنوعی وجود دارد.



شکل ۴-۲-۵ فلزات، نیم رسانا، عایقها. فلزات باندهای انرژی پر نشده دارند، نیم رساناها بالای باند ظرفیتی پر شده (VB) شکاف ممنوع کوچکی که تنها تعدادی الکترون می توانند «از شکاف بگذرند» و به باند رسانش (CB) برسند. عایقها شکاف انرژی بزرگی دارند که مانع عبور الکترونهاست.

که تنها الکترونهای پر انرژی می توانند «از شکاف بگذرند» و به باند رسانش برسند (بخش ۴-۵).

مثال ۱-۲-۵ مقاومت ویژه نقره را در 40°C - حساب کنید.

حل: از جدول ۱-۲-۵، $\rho_T = 0.00038 / ^{\circ}\text{C}$ و $\rho = 15 \text{ ohm} \cdot \text{nm}$ در 0°C

$$\rho_{-40^{\circ}\text{C}} = 15 \text{ ohm} \cdot \text{nm} [1 + (0.00038 / ^{\circ}\text{C})(-40^{\circ}\text{C})]$$

▲
$$= 13 \text{ ohm} \cdot \text{nm}$$

مثال ۲-۲-۵ بدون در نظر گرفتن دما، هر درصد اتمی قلع مقاومت ویژه مس را $30 \text{ ohm} \cdot \text{nm}$ افزایش می دهد. مقاومت ویژه آلیاژی حاوی ۹۹ Cu-۱Sn (درصد وزنی) در 100°C چقدر است؟

حل: مبنا: 100 amu

$$\text{Sn: } \frac{1 \text{ amu}}{118.7 \text{ amu/atom}} = 0.0084 = 0.84 \text{ a/o}$$

$$\text{Cu: } \frac{99 \text{ amu}}{63.54} = \frac{15551}{15665}$$

مجموع مقاومت های ویژه آلیاژ و دما برابر است با

$$\begin{aligned}\rho &= (0.052 \text{ a/o})(20 \text{ ohm} \cdot \text{nm per a/o}) \\ &+ 16 \text{ ohm} \cdot \text{nm} [1 + (0.00039/^{\circ}\text{C})(100^{\circ}\text{C})] \\ &= 38 \text{ ohm} \cdot \text{nm} \quad (\text{یا } 38 \times 10^{-9} \text{ ohm} \cdot \text{m})\end{aligned}$$

توضیح. افزایش مقاومت ویژه بر حسب ترکیب در غلظت‌های کم جسم حل‌شدنی، تقریباً خطی است.

مثال ۳-۲-۵ نوعی برشته‌کننده نان که به برق ۱۱۰ ولتی متصل است هنگامی که سیم مقاومت آن از جنس نیکروم باشد در 87°C ، ۳۰۰ وات مصرف می‌کند الف) وقتی که گرم است جریان مصرفی چقدر است؟ ب) بلافاصله پس از روشن کردن (در 20°C) جریان چقدر است؟

حل:

$$I = \frac{300 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 2.7 \text{ A} \quad (\text{الف})$$

$$R_{87^{\circ}\text{C}} = \frac{110 \text{ V}}{2.7 \text{ A}} = 40 \Omega \quad (\text{ب})$$

از آنجا که تغییر بعد کم (و نسبتاً قابل اغماض) است

$$\frac{R_{20^{\circ}\text{C}}}{R_{87^{\circ}\text{C}}} = \frac{\rho_{20^{\circ}\text{C}}}{\rho_{87^{\circ}\text{C}}}$$

از رابطه (۱-۲-۵) و جدول ۱-۲-۵ داریم

$$R_{20} = R_{87} \left[\frac{\rho_0 (1 + \gamma_T 20^{\circ}\text{C})}{\rho_0 (1 + \gamma_T 87^{\circ}\text{C})} \right]$$

$$= 40 \Omega \frac{1 + 0.0004(20)}{1 + 0.0004(87)}$$

$$= 40 \Omega \left[\frac{1.0008}{1.0348} \right] = 30 \Omega$$

$$I_{20} = \frac{110 \text{ V}}{30 \Omega} = 3.7 \text{ A}$$

توضیح. اگر جریان ۳۷ آمپر ادامه یابد و ما از 870°C بالاتر می‌رود و موجب اکسایش بیشتر و خرابی می‌شود.
باید دانست که ضریب گرمایی مقاومت ویژه در آلیاژها کمتر از فلزات خالص است، زیرا میانگین مسیر آزاد الکترون‌ها در آلیاژ از ابتدا کم و مقاومت ویژه زیاده‌تر است. ▲

۵-۳ عایق‌ها

با توجه به باندهای انرژی، عایق را می‌توان ماده‌ای دانست که بین بالاترین باند ترانزپرفیتی پر شده و باند خالی بعدی شکاف انرژی بزرگی دارد (شکل ۵-۲-۴). اندازه این شکاف آن قدر بزرگ است که در تمام موارد مانع از عبور الکترون‌ها می‌شود و آنها را در باند پایینتر نگه می‌دارد. عدد n آنها در باند رسانش در رابطه (۵-۱-۱) فوق‌العاده کم است. معمولاً برای توصیف الکترون‌های ظرفیتی گفته می‌شود که آنها با یون‌های منفی پیوند دارند (با در پیوند اشتراکی شرکت دارند). در NaCl برای جدا کردن يك الکترون از Cl^- حدود ۷ الکترون‌ولت ($[10^{18} \times 1.1] =$) و در الماس برای جدا کردن يك الکترون از پیوند اشتراکی آن تقریباً ۶ الکترون‌ولت انرژی لازم است. این انرژی‌های فعالسازی ۷ eV و ۶ eV در واقع اندازه شکافهای انرژی محسوب می‌شوند و آنها را می‌توان با سیلیسیم (۱.۱ eV) و ژرمانیم (۰.۷ eV) که در بخش بعد آمده است مقایسه کرد. در فیزیک مرز جدایی بین عایق و نیمرسانا جسابی فرض می‌شود که شکاف انرژی حدود ۴ eV ($[10^{-18} \times 0.4] =$) باشد. به این ترتیب NaCl و الماس، عایق‌های برق و سیلیسیم و ژرمانیم نیمرسانا به‌شمار می‌آیند* (شکل ۵-۱-۱).

مثال ۵-۳-۱ بین دو صفحه الکترود که ولتاژ ۱۱۰ ولت بین آنها برقرار است، لایه‌ای از پلی‌اتیلن به ضخامت ۰.۱ mm به عنوان دی‌الکتریک به کار رفته است. بر اساس شکل ۵-۱-۱ شار الکترون از این لایه چقدر است؟

حل: $1\text{ m}^2 = 1\text{ مینا}$ و 1 sec

$$R = \frac{(10^{14} \Omega \cdot \text{m})(10^{-4} \text{ m})}{(1\text{ m}^2)} = 10^{10} \Omega$$

$$I = \frac{110\text{ V}}{10^{10} \Omega} = 11 \times 10^{-9} \text{ A}$$

* الماس اگر ناخالصی داشته باشد می‌تواند نیمرسانا باشد همچنین در شرایط مناسب برای نفوذ سدیم، NaCl نیز نیمرسانای یونی خواهد بود.

$$\frac{(11 \times 10^{-9} \text{ A/m}^2)}{(\text{الکترون} / \text{sec} \cdot \text{m}^2 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{sec})} = 7 \times 10^{10}$$

توضیح. جریان حاصل، کوچک اما قابل اندازه گیری است. در اندازه گیری، عواملی مانند ناخالصیها، تخلخلهای سوزنی، و نشت سطحی نیز باید در نظر گرفته شوند. ▲

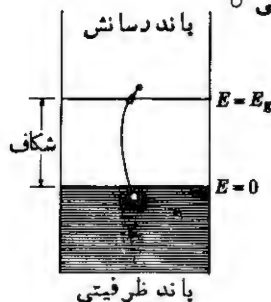
۴-۵ نیم رساناهای ذاتی

تفاوت بین نیم رساناها و عایقها در اندازه شکافهای انرژی ممنوع آنهاست (شکل ۴-۵-۲). در نیم رساناها شکاف انرژی به گونه ای است که تعداد معینی الکترون می توانند از باند ظرفیتی پر به باند خالی رسانش برسند (شکل ۴-۵-۱). این الکترونها ضمن حرکت به طرف الکتروود مثبت، انرژی بیشتری کسب می کنند. به علاوه حفره های الکترونی که به این ترتیب در باند ظرفیتی ایجاد شده اند موجب رسانش می شوند زیرا الکترونهای باندهای پایینتر خواهند توانست با کسب انرژی به این ترازهای خالی شده، برسند.

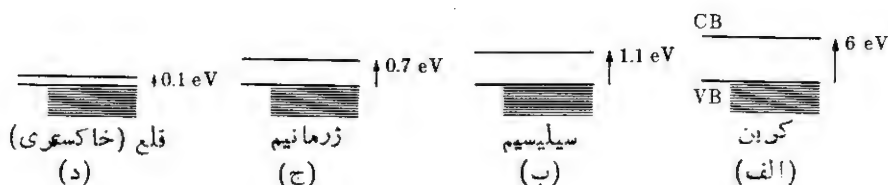
شکل ۴-۵-۲ نمودار طرحوار میزان شکاف انرژی در C (الماس)، Si، Ge و Sn (خاکستری) است. در الماس این شکاف بزرگتر از آن است که تعداد قابل ملاحظه ای الکترون بتوانند از آن عبور کنند، بنا بر این الماس عایق محسوب می شود (جدول ۴-۵-۱). با پایین آمدن از گروه IV جدول تناوبی و رسیدن به سیلیسیم، ژرمانیم و قلع تعداد حاملهای بار افزایش می یابد، در نتیجه رسانندگی طبق جدول مذکور بیشتر می شود. این رسانندگی از مشخصات ذاتی این مواد است، و از ناخالصیها ناشی نمی شود. در نتیجه نیم رسانندگی ذاتی نامیده می شود.

• الکترون رسانشی

○ حفرة الکترونی



شکل ۴-۵-۱ در نیم رساناها تعداد قابل توجهی از الکترونهای ظرفیتی می توانند از شکاف انرژی ممنوع بگذرند و الکترون، حامل بار منفی در باند رسانش است. حفرة الکترونی، حامل بار مثبت در باند ظرفیتی است.



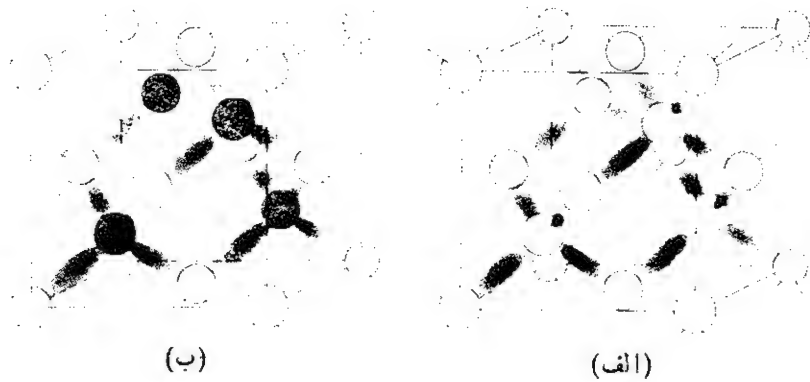
شکل ۴-۵-۲ شکاف انرژی در عناصر گروه IV (طرحواره). تمام این عناصر می‌توانند ساختار یکسان داشته باشند و همگی باندهای پر شده دارند. در این میان قلع که کوچکترین شکاف انرژی را دارد در دمای معمولی بیشترین الکترون را در باند رسانش (CB) داد، و بنا بر این رسانندگی آن از همه بیشتر است، (به جدول ۴-۵-۱ رجوع کنید).

جدول ۴-۵-۱ شکافهای انرژی در عناصر نیمه‌رسانا

در 20°C (68°F)		شکاف انرژی E_g		عنصر
کسر الکترونهاى ظرفیتی رسانندگی، σ	با انرژی $E_g <$	eV	10^{-18}J	
$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$				
$< 10^{-16}$	$\sim 1/30 \times 10^{21}$	~ 6	۵۹۹۶	C (الماس)
5×10^{-4}	$\sim 1/10^{13}$	۱٫۱	۵۹۱۷۶	Si
۲	$\sim 1/10^{10}$	۰٫۷	۵۹۱۱۲	Ge
10^6	$\sim 1/5000$	۰٫۱	۵۵۱۶	Sn (خاکستری)

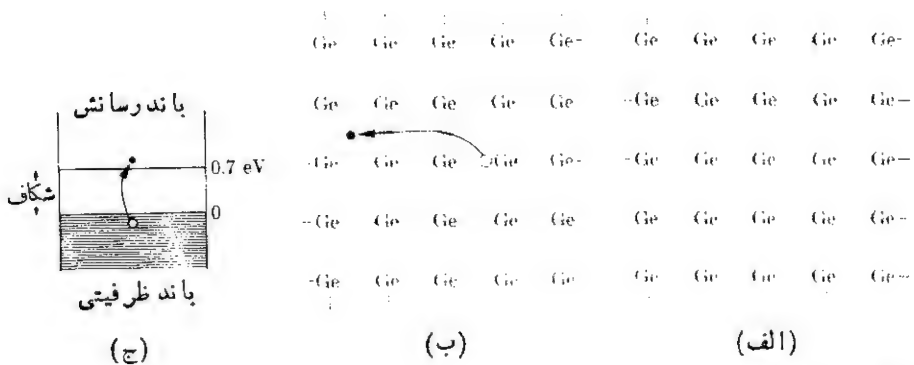
ساختار بلوری الماس بار دیگر در شکل ۴-۵-۳ (الف) تکرار شده است (قبلاً در فصل ۲ آمده بود). هر اتم کربن دارای عدد کوئوردیناسیون ۴ است و هر جفت اتم همسایه، یک جفت الکترون به اشتراک گذاشته‌اند (بخش ۲-۲). سیلیسیم، ژرمانیم، و قلع خاکستری نیز چنین ساختاری دارند.* شکل ۴-۵-۴ با استفاده از ژرمانیم طرحواره مکانیسم نیمه‌رسانندگی را در این عناصر نشان می‌دهد.

* قلع سفید یکی از معروفترین چندشکلیهاست. بالای 13°C پایدار است (ولی می‌توان آن را تا دمای کمتری نیز فوق سرد کرد) چگالی قلع سفید (bct) بیشتر از قلع خاکستری است. ($\rho_g = 5.7 \text{ Mg/m}^3$ که در حالی که $\rho_w = 7.3 \text{ Mg/m}^3 = 7.3 \text{ g/cm}^3$) بنا بر این باندهای انرژی در قلع سفید همپوشانی دارند و این فاز رسانای فلزی است (به شکل ۴-۵-۲ (ب) رجوع کنید).



شکل ۳-۴-۵ ساختار بلوری نیم رساناهای متداول. الف) الماس، سیلیسیم، ژرمانیم، و قلع خاکستری؛ ب) InP ، GaAs ، GaP ، ZnS ، و ... (به شکل ۳-۲-۸ رجوع کنید). تنها اختلاف دو ساختار در این است که در ترکیبات نیم رسانا، دو نوع اتم وجود دارد که نقاط شبکه را متناوباً پر کرده اند. عدد کوئوردیناسیون برای تمام اتمها ۴ است. به طور متوسط هر اتم چهار الکترون ظرفیتی و هر پیوند دو الکترون دارد.

علاوه بر چهار عنصر گروه IV که نیم رسانندگی را از ساختاری نظیر شکل ۳-۴-۵ (الف) به دست آورده اند، تعدادی از ترکیبات گسروههای III-V نیز دارای چنین ساختاری اند [شکل ۳-۴-۵ (ب)]. اتمهای عناصر گروه III جدول تناوبی (Ga ، In)، B ، Al به طور متناوب با اتمهای عناصر گروه V (N ، P ، As ، Sb) در ساختار بلوری



شکل ۴-۴-۵ نیم رسانا ذاتی (ژرمانیم). الف) نمایش طرحوار الکترونها در پیوند اشتراکی (و ظرفیتی آنها)؛ ب) جفت الکترون - حفره (الکترون مثبت، سمت چپ فرض شده است)؛ ج) شکاف انرژی که الکترون پس از گذشتن از آن به باند رسانش می رسد. در مقابل هر الکترون رسانش، یک حفره در الکترونها ظرفیتی ایجاد شده است.

قرار می گیرند. اکثر این ۱۶ ترکیب III-V که می توانند از این عناصر تشکیل شوند نیم رسانا نبند زیرا هر اتم چهار همسایه دارد و به طور متوسط چهار الکترون ظرفیتی به اشتراک گذاشته است، و در این صورت حالتی نظیر آنچه در سیلیسیم و ژرمانیم، نیم رساناهای اصلی، وجود دارد ایجاد خواهد شد.

تحرک بار. حال باید رابطه اولیه در مورد رسانندگی (رابطه ۱-۴-۱) را مطابق با شکل ۱-۵-۴ شرح داد، زیرا نیم رسانای ذاتی هر دو حامل مثبت و منفی را دارد. الکترونها می توانند رسانش می دهند، حاملهای نوع منفی اند. رسانندگی ایجاد شده توسط این الکترونها، به μ_n آنها از میان رسانش نیم رسانا بستگی دارد. حفره های الکترونی تشکیل شده در باند ظرفیتی حاملهای نوع مثبت اند.* رسانندگی که ایجاد می کنند به μ_p آنها از میان باند ظرفیتی نیم رسانا بستگی دارد. رسانندگی کل از اتحاد هر دو حاصل می شود.

$$\sigma = n_n q \mu_n + n_p q \mu_p \quad (1-4-5)$$

البته، هم الکترون و هم حفره الکترونی همان بار واحد اصلی 1.6×10^{-19} کولن را حمل می کنند. در نیم رسانای ذاتی به ازای هر الکترون رسانشی یک حفره الکترونی ایجاد می شود و $n_n = n_p$ است بنابراین می توان رابطه (۱-۴-۵) را ساده کرد. ولی در نیم رساناهای خارجی این دو مقدار مساوی نیستند، بنابراین بهتر است شکل کلی این رابطه به همان صورت باقی بماند.

جدول ۲-۴-۵ مشخصات تعدادی از نیم رساناها را نشان می دهد و در این زمینه دو نکته مهم را می توان عمومیت داد:

۱. اندازه شکاف انرژی برای عناصر جدول تناوبی از بالا به پایین کم می شود،
($C \rightarrow Si \rightarrow Ge \rightarrow Sn$) یا ($GaP \rightarrow GaAs \rightarrow GaSb$) یا ($AlSb \rightarrow GaSb \rightarrow InSb$)
۲. تحرک الکترونها در نیم رسانا از تحرک حفره های الکترونی در همان نیم رسانا بیشتر است.** این موضوع در کاربرد نیم رساناهای نوع n در مقایسه با نوع p بسیار مهم است.

نیم رسانای (ذاتی) بر حسب دما. برخلاف فلزات که در دماهای بالا افزایش مقاومت ویژه (و کاهش رسانندگی) نشان می دهند (شکل ۱-۲-۵)، در نیم رساناهای ذاتی با زیاد شدن دما رسانندگی افزایش می یابد. توضیح آنکه تعداد حاملهای بار، n ، مستقیماً با تعداد

* در مقایسه با آن، آنیونها که الکترونها را اضافی دارند از نوع منفی اند، و کاتیونها که کمبود الکترون دارند از نوع مثبت اند.

** این رابطه برای تمام نیم رساناهای جدول ۲-۴-۵ وجود دارد، به استثنای $AlSb$ که در آن داده های مربوط به تحرک دقیقاً مشخص نشده اند.

جدول ۵-۴-۲ خواص نیم رساناهای معمولی (25°C)

ماده	شکاف انرژی، E_g		تحرك، $m^2/volt \cdot sec$		رسانندگی	ثابت
	$10^{-18}J$	eV	الکترون، μ_n	حفرة، μ_p	ذاتی، $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	شبکه، a ، nm
عناصر						
C (الماس)	۰.۰۹۶	~۶	۰.۰۱۷	۰.۰۱۲	$< 10^{-16}$	۰.۳۵۷
سیلیسیم	۰.۰۱۷۶	۱.۰۱	۰.۰۱۹	۰.۰۰۴۲۵	5×10^{-4}	۰.۵۴۳
ژرمانیم	۰.۰۱۱۲	۰.۰۷	۰.۰۳۶	۰.۰۲۳	۲	۰.۵۶۶
قلع (خاکستری)	۰.۰۵۱۶	۰.۰۱	۰.۰۲۰	۰.۰۱۰	10^6	۰.۶۴۹
ترکیبات						
AlSb	۰.۰۲۶	۱.۰۶	۰.۰۰۲	—	—	۰.۶۱۳
GaP	۰.۰۲۸	۲.۰۳	۰.۰۰۱۹	۰.۰۰۱۲	—	۰.۵۴۵
GaAs	۰.۰۲۲	۱.۰۴	۰.۰۸۸	۰.۰۰۴	10^{-6}	۰.۵۶۵
GaSb	۰.۰۱۱	۰.۰۷	۰.۰۶۰	۰.۰۰۸	—	۰.۶۱۲
InP	۰.۰۲۱	۱.۰۳	۰.۰۴۷	۰.۰۰۱۵	۵۰۰	۰.۵۸۷
InAs	۰.۰۵۵۸	۰.۰۳۶	۲.۰۲۶	۰.۰۰۲۶	10^4	۰.۶۰۴
InSb	۰.۰۰۲۹	۰.۰۱۸	۸.۰۲	۰.۰۱۷	—	۰.۶۴۸
ZnS	۰.۰۵۹	۳.۰۷	۰.۰۰۱۴	۰.۰۰۰۰۵	—	—
SiC (شش بر)	۰.۰۴۸	۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰۲	—	—

الکترونی که از شکاف انرژی می گذرند زیاد می شود (شکل ۵-۴-۱). در دمای صفر مطلق هیچ الکترونی انرژی لازم برای این کار ندارد، ولی با بالا رفتن دما الکترون ها درست مانند اتم ها انرژی کسب می کنند. در 25°C تعداد قابل توجهی از الکترون های ظرفیتی سیلیسیم، ژرمانیم و قلع بیش از شکاف انرژی، E_g ، انرژی دارند (جدول ۵-۴-۱) این موضوع برای نیم رسانای ترکیبی نیز صادق است.

از آنجا که توزیع انرژی گرمایی الکترون ها شبیه توزیع انرژی گرمایی اتم ها در رابطه (۴-۶-۳) است می توان نوشت

$$n_i \propto e^{-(E-\bar{E})/kT} \quad * (۵-۴-۲، الف)$$

در این رابطه n_i تعداد الکترونهاي باند رسانش در هر متر مکعب (و تعداد حفره‌های باند ظرفیتی در هر متر مکعب) است. در شکاف انرژی ممنوع نیم رسانای ذاتی انرژی متوسط \bar{E} در نیمه شکاف است، بنابراین $E_g/2$.

$$n_i \propto e^{-E_g/2kT} \quad (۵-۴-۲، ب)$$

مانند فصل ۴، T دمای مطلق (K)، و k ثابت بولتزمان است و معمولاً به جای $[J/K] \times 10^{-23}$ یا $1.38 \times 10^{-23} \text{ eV/K}$ به صورت $8.61 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ نوشته می‌شود. رسانندگی σ مستقیماً به تعداد حاملهای n بستگی دارد؛ بنابراین

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \quad (۵-۴-۳، الف)$$

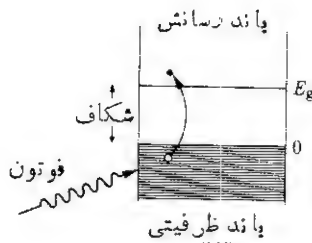
که در آن σ_0 ثابت تناسب است که بین عوامل دیگر شامل q و μ از رابطه (۵-۱-۱)، می‌شود و همچنین، تحرک μ با دما مقداری تغییر می‌کند؛ ولی تغییرات آن در گستره معمولی بیشتر نیم رساناها، در مقایسه با تغییرات تعداد حاملهای n که به صورت تابع نمایی است، کوچک است. در نتیجه این رابطه را می‌توان به صورت رابطه آرنیوس نوشت

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2kT} \quad (۵-۴-۳، ب)$$

اگر رسانندگی (یا مقاومت ویژه) را در آزمایشگاه در چند دمای مختلف تعیین کنیم و $\ln \sigma$ را بر حسب $1/T$ بکشیم شیب منحنی مقدار شکاف انرژی (E_g) را مشخص خواهد کرد، یعنی شیب برابر است با $-E_g/2k$ و با استفاده از E_g و یکی از مقادیر معلوم σ ، می‌توان σ را در دمای دیگری نیز محاسبه کرد (مثال ۵-۴-۴).

رسانش نوری. در شرایط عادی احتمال بسیار کمی وجود دارد که الکترون ظرفیتی سیلیسیم از شکاف انرژی گذشته به باند رسانش برسد (مطابق جدول ۵-۴-۱ این احتمال تقریباً 10^{13} است). برعکس یک فوتون نور قرمز (طول موج 660 nm)، 1.9 eV انرژی دارد که از انرژی لازم برای پدیدن الکترون از شکاف انرژی 1.1 الکترون ولتی سیلیسیم بیشتر است (شکل ۵-۴-۵). بنابراین سیلیسیم هنگامی که در معرض نور قرار می‌گیرد، رسانندگی آن در اثر افزایش نوری تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

* رابطه‌های (۵-۴-۲، الف) و (۵-۴-۳، الف) فقط در انتهای بالایی گستره انرژی مشابه‌اند. در آن گستره، اصل یا تئوری در مورد دو الکترون در هر حالت کوانتومی محدود کننده نیست، زیرا احتمال اشغال آنها بسیار کم است. البته توجه ما به انتهای بالایی گستره و به الکترونهاي اولیه‌ای که از شکاف عبور می‌کنند معطوف است.



شکل ۵-۴-۵ رسانش نوری. با برخورد يك فوتون (يعنی انرژی نوری) به الكترون، انرژی لازم جهت انتقال الكترون به باند رسانش در آن ایجاد می‌شود و جفت «الکترون رسانش + حفره ظرفیتی» ایجاد و حامل بار تولید می‌شود. هنگام بازگشت الكترون به باند ظرفیتی، باز ترکیب [رابطه ۴-۴-۵ (ب)] صورت می‌گیرد.

پایه ترکیب. مطابق با شکل ۵-۴-۵ واکنشی را که سبب ایجاد يك جفت الكترون - حفره می‌شود به صورت زیر می‌توان نوشت



که در آن E انرژی، n الکترون رسانش، و p حفره پدید آمده در باند ظرفیتی است. در این حالت انرژی از نور به دست می‌آید، ولی می‌تواند از منبع انرژی دیگری مثل گرما یا الکترونیایی با حرکت سریع نیز به دست آید.

از آنجا که تمام مواد هنگامی که انرژی خود را کم می‌کنند پایدارترند، جفت الکترون - حفره دیر یا زود باز ترکیب خواهد شد



در این حالت الکترون مجدداً از باند رسانش به باند ظرفیتی برمی‌گردد و درست مطابق با عکس شکل ۴-۴-۵ (ج) عمل می‌کند. اگر نور یا منبع انرژی دیگری برای تولید مداوم جفتهای الکترون - حفره وجود نداشته باشد، باند رسانش به تدریج خالی خواهد شد.

برای باز ترکیب شدن، در مواد مختلف زمان متفاوت است، با این حال يك قاعده خاص رعایت می‌شود، زیرا در يك ماده معین برای هر الکترون رسانش احتمال باز ترکیب شدن در این لحظه و در ثانیه‌ها (یا دقیقه‌ها) ی بعد یکسان است و رابطه زیر را می‌توان ذکر کرد

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (\text{الف، ۴-۴-۵})$$

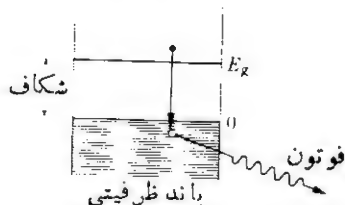
که معمولاً به صورتی که در صفحه بعد آمده است تغییر شکل می‌یابد

$$\ln(N_0/N) = t/\tau \quad (۵-۴-۵) \text{ ب) }^*$$

در این رابطه‌ها N_0 تعداد الکترونهاى موجود در باند رسانش در زمان معین (مثلاً هنگام خاموش شدن منبع نورانى) و N تعداد الکترونهاى رسانش باقى مانده پس از زمان t است. τ زمان باز ترکیب یا اُفت نامیده مى‌شود و از ویژگیهای ماده است.

□ لیانی. انرژی آزاد شده در رابطه (۵-۴-۴) ب)، ممکن است به صورت گرما یا نور ظاهر شود. اگر به صورت نور ظاهر شود از لیانی صحبت به میان می‌آید (شکل ۵-۴-۶). گاهی لیانی به چند نوع تقسیم می‌شود، لیانی نوری پدیده‌ای است که در آن الکترون به وسیله فوتون نور تحریک می‌شود و به باند رسانش صعود می‌کند، در لیانی شیمیایی تحریک اولیه ناشی از واکنشهای شیمیایی است، لیانی الکتریکی احتمالاً معروفترین نوع است زیرا پدیده‌ای است که در لامپ تلویزیون انجام می‌گیرد. در داخل لامپ تلویزیون جریانی از الکترونها (اشعه کاتدی) که صفحه تصویر را جارو می‌کنند موجب می‌شوند که الکترونهای سفر به باند رسانش انتقال یابند. تقریباً بلافاصله الکترونها و حفره‌ها باز ترکیب می‌شوند و انرژی به صورت نور مرئی صادر می‌شود.

از آنجا که سرعت باز ترکیب با تعداد الکترونهای تحریک شده متناسب است، شدت لیانی، I ، از رابطه‌ای نظیر (۵-۴-۵) ب) پیروی می‌کند



شکل ۵-۴-۶ لیانی. هر یک هزارم ثانیه جزئی از الکترونهای تحریک شده که به باند رسانش رفته‌اند به باند ظرفیتی باز می‌گردند و همین که از شکاف انرژی می‌گذرند انرژی به صورت فوتون نور آزاد می‌شود.

* رابطه (۵-۴-۵) را می‌توان از راه محاسبه از اطلاعات فوق به دست آورد

$$dN/dt = -N/\tau \quad (۵-۴-۶)$$

$$dN/N = -dt/\tau \quad \text{با جا به جا کردن وسطین داریم}$$

پس از انتگرال گیری رابطه زیر به دست می‌آید

$$\ln N/N_0 = -t/\tau \quad (۵-۴-۷) \text{ ج)}$$

$$\ln(I_0/I) = t/\tau \quad (۷-۴-۵)$$

در لامب تلویزیون فسفر به عنوان ماده ایانی انتخاب می شود و زمان افت آن چنان است که نور به طور مداوم تولید می شود. یعنی بین دو جارو کردن صفحه تصویر گسیل شدن نور ادامه می یابد. در نتیجه چشم بیننده تاریکی و روشنایی متناوب را تشخیص نمی دهد. با این حال شدت نور از واکنش قبلی باید به اندازه کافی ضعیفتر شده باشد تا نور جدید که حدود $1/30$ ثانیه بعد می آید قابل تشخیص باشد. (به مثال ۵-۴-۵ مراجعه کنید).

مثال ۵-۴-۱ الف) چه کسری از بار در سیلیسیم که نیم رسانای ذاتی است توسط الکترونها حمل می شود؟ **ب)** چه کسری توسط حفره های الکترونی حمل می شود؟

حل: از رابطه (۵-۴-۱) و جدول ۵-۴-۲، و با داشتن $n_n = n_p$ در نیم رسانای ذاتی داریم

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_n}{\sigma} &= \frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} \\ &= \frac{0.19 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}}{0.2325 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}} = 0.82 \\ \frac{\sigma_p}{\sigma} &= 0.18 \end{aligned}$$

توضیح. به طور کلی رسانندگی در باند رسانش بیشتر است از رسانندگی ناشی از حفره های الکترونی در باند ظرفیتی. ▲

مثال ۵-۴-۲ از جدول ۵-۴-۲، ترکیب گالیم رسانید در 20°C دارای رسانندگی ذاتی $10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ است. چه تعداد الکترون از شکاف انرژی عبور کرده اند؟

حل: از رابطه (۵-۴-۱) داریم

$$\begin{aligned} n &= \frac{(10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})}{(0.16 \times 10^{-18} \text{ amp} \cdot \text{sec})(0.888 + 0.04 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{sec})} \\ &= \frac{6.78 \times 10^{12}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

توضیح. در هر متر مکعب $10^{13} \times 10^{13}$ حامل وجود خواهد داشت. زیرا هر الکترونی که تحریک شده از شکاف انرژی می گذرد یک حفره الکترونی باقی می گذارد. ▲

مثال ۳-۴-۵ قلع خاکستری چهار اتم ظرفیتی دارد و اندازه سلول واحد آن ۰.۳۵۴۹ nm است [شکل ۳-۴-۵ (الف)]. محاسبات متعدد نشان می‌دهند که در هر سانتی متر مکعب ۲×۱۰^{۲۵} الکترون رسانش وجود دارد. چه کسری از الکترونها به باند رسانش رفته اند؟ حل: بر اساس محاسبات انجام شده از روی شکل ۳-۴-۵، در هر سلول واحد هشت اتم قلع وجود دارد.

= الکترونهای ظرفیتی در یک سانتی متر مکعب

$$\frac{(۴ \text{ الکترون در هر اتم}) \times (۸ \text{ اتم در هر سلول واحد})}{\text{سلول واحد} / (۰.۳۵۴۹ \times ۱۰^{-۹} \text{ m})^3} = \frac{۱.۱۷ \times ۱۰^{۲۹}}{\text{m}^3}$$

▲ کسر الکترونهای فعال شده $= \frac{۲ \times ۱۰^{۲۵}}{۱.۱۷ \times ۱۰^{۲۹}} \approx ۰.۰۰۰۰۲$

مثال ۴-۴-۵ مقاومت ویژه ژرمانیم در ۲۰°C (۶۸°F) برابر با $۰.۵ \Omega \cdot \text{m}$ است. در ۴۰°C (۱۰۴°F) مقاومت ویژه آن چقدر است؟

حل: با استفاده از رابطه (۳-۴-۵) و اندازه شکاف انرژی ۰.۷ eV (جدول ۲-۴-۵)

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1}{\sigma_2} &= \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_0 e^{-E_g/2kT_1}}{\sigma_0 e^{-E_g/2kT_2}} \\ \ln \frac{\rho_1}{\rho_2} &= \left(\frac{E_g}{2k} \right) \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (۸-۴-۵) \\ &= \frac{۰.۷ \text{ eV}}{2(۸۶۰۱ \times ۱۰^{-۶} \text{ eV/K})} \left[\frac{1}{۲۹۳ \text{ K}} - \frac{1}{۳۱۳ \text{ K}} \right] = ۰.۰۹ \end{aligned}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \sim ۲.۲۵$$

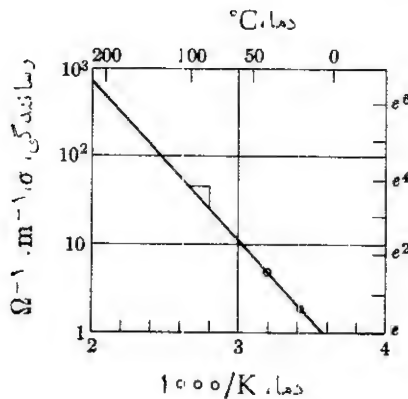
پس اگر $\rho_{۴۰^\circ \text{C}} = ۰.۵ \Omega \cdot \text{m}$ ، $\rho_{۲۰^\circ \text{C}} = ۰.۲۲ \Omega \cdot \text{m}$

دامحل دیگر: با استفاده از شیب (شکل ۷-۴-۵)

$$\text{شیب} = - \frac{۰.۷ \text{ eV}}{2(۸۶۰۱ \times ۱۰^{-۶} \text{ eV/K})} = -۲۰۶۰ \text{ K}$$

یا

$$\text{شیب} = - \frac{۰.۱۱۲ \times ۱۰^{-۱۸} \text{ J}}{2(۱۳۷۸ \times ۱۰^{-۲۴} \text{ J/K})} = -۴۰۶۰ \text{ K}$$



شکل ۷-۴-۵ نیم‌رسانش بر حسب دما (ژرمانیم با رسانندگی ذاتی). شیب منحنی برابر $-E_g/2k$ در رابطه ۳-۴-۵ است. صورت $\ln \sigma$ و منجر عکس دما K^{-1} است. (مثال ۴-۴-۵ را ببینید)

یا

در 20°C (●)

$$\ln \sigma = \ln (1/0.5 \, \Omega \cdot \text{m}) = 0.693 \quad (\text{یا } \log_{10} = 0.301)$$

$$1/T = 1/293 \text{ K} = 0.00341 / \text{K} \quad (\text{یا } 1000/T = 3.41)$$

در 40°C (○)

$$1/T = 1/313 \text{ K} = 0.00319 / \text{K} \quad (\text{یا } 1000/T = 3.19)$$

$$-4060 \text{ K} = \frac{0.693 - \ln \sigma_{40^\circ\text{C}}}{(0.00341 - 0.00319) / \text{K}}$$

$$\ln \sigma_{40^\circ\text{C}} = 1.6 \quad (\text{یا } \log_{10} \sigma_{40^\circ\text{C}} = 0.7)$$

$$\sigma_{40^\circ\text{C}} = 5 \, \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \quad (\text{یا } \rho = 0.2 \, \Omega \cdot \text{m})$$

توضیح. تغییر مقاومت (و بنابراین تغییر مقاومت ویژه) ۱۰٪ قابل اندازه‌گیری است. پس می‌توان بدین وسیله تغییرات خیلی جزئی دما را نیز اندازه‌گیری کرد (مسئله ۱-۶-۵).

□ مثال ۵-۴-۵ اشعه‌الکترونی صفحه‌تلوویزیون، در هر ثانیه ۳۰ بار صفحه را جارومی‌کند. اگر ماده روی صفحه تصویر، فسفر باشد و هنگام دیدن پرتو بعدی تنها ۲۰٪ از پرتو قبلی باقی بماند، زمان افت الکترونها ی فعال شده فسفر را بیابید.

حل: با استفاده از رابطه (۵-۴-۷)

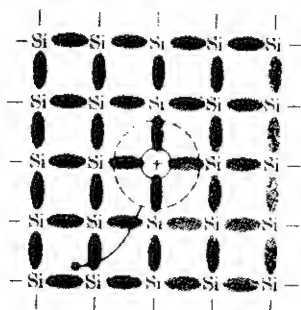
$$\ln\left(\frac{1000}{0.020}\right) = \frac{0.033 \text{ sec}}{\tau}$$

$$\tau = 0.002 \text{ sec}$$

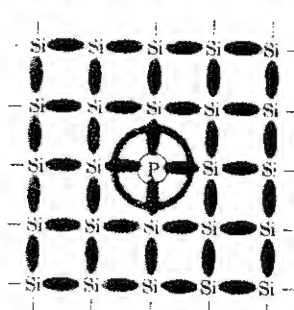
توضیح. واژه فوتوئورسانی وقتی به کار می رود که زمان افت نسبت به کل زمان دیدن اندک باشد، اگر لیانی پس-تاب داشته باشد واژه فسفرسانی را به کار می بریم. ▲

۵-۵ نیم رساناهای خارجی

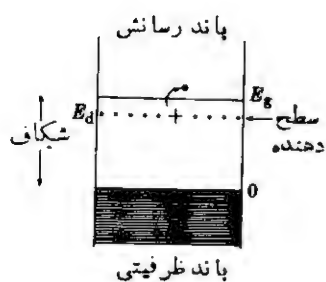
نیم رسانای نوع N . ناخالصیها با ایجاد الکترون اضافی یا حفره اضافی می توانند بر خاصیت نیم رسانایی مواد اثر بگذارند. مثلاً سیلیسیم را که شامل یک اتم فسفر است در نظر بگیرید. سیلیسیم چهار الکترون ظرفیتی دارد، حال آنکه فسفر دارای پنج الکترون ظرفیتی است. در شکل ۵-۵-۱ (الف) این الکترون، مستقل از جفت الکترونی که بین اتمهای مجاور پیوند برقرار کرده اند دیده می شود. این الکترون می تواند بار الکتریکی را به طرف



(ب)



(الف)

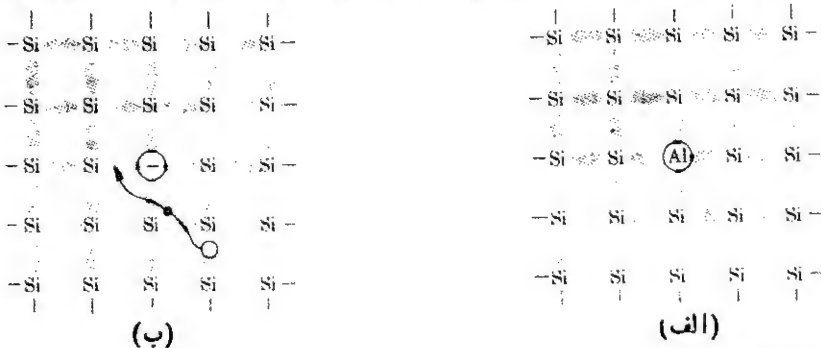


(ج)

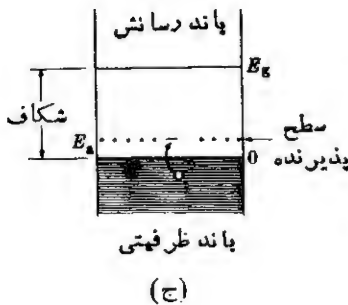
شکل ۵-۵-۱ نیم رسانای خارجی (نوع n). اتمهای گروه V از عناصری که در شکل ۵-۴-۳ دیده می شوند و به طور متوسط دارای ۴ الکترون ظرفیتی اند، دارند. در میدان الکتریکی، این الکترون با اندکی انرژی از اتم مادر جدا می شود و به باند رسانش «ارسال» می شود تا حامل بار الکتریکی شود. به این ترتیب انرژی تر از دهنده، E_d ، قبل از بالاترین نقطه شکاف انرژی واقع است. (الف) ناخالصی نوع n ، مثل فسفر؛ ب) اتم یونیده فسفر (الکترون مثبت در سمت چپ قرار گرفته است)؛ ج) مدل باند.

الکترون مثبت حمل کند [شکل ۵-۵-۱ (ب)]. در حالت دیگر در شکل ۵-۵-۱ (ج)، الکترون اضافی که نمی تواند در باند ظرفیتی که قبلاً پر شده قرار گیرد، در قسمت بالای شکاف انرژی خواهد ماند. از این موقعیت که نرازه‌دهنده، E_g ، نام دارد خواهد توانست به راحتی فعال شده به باند رسانش صعود کند. بنابراین مشاهده می شود که بدون در نظر گرفتن اینکه چه مدلی به کار رفته، شکل ۵-۵-۱ (ب) یا ۵-۵-۱ (ج)، عناصر گروه V جدول تناوبی (شکل ۱-۱-۲)، (N، P، As، Sb)، می توانند حامل بار منفی (یا نوع n) را در نیمرساناها پدید آورند.

نیمرساناهای نوع P. عناصر گروه III (B، Al، Ga، In) تنها سه الکترون ظرفیتی دارند و هنگامی که به صورت ناخالصی به سیلیسیم افزوده شوند حفره الکترونی به وجود خواهند آورد. همچنان که در شکل ۵-۵-۲ (الف) و (ب) دیده می شود هر اتم آلومینیم می تواند یک الکترون بپذیرد و در واقع مثل آن است که یک بار مثبت به طرف الکترون منفی حرکت کرده باشد. با استفاده از مدل باند [شکل ۵-۵-۲ (ج)] مشاهده می شود که اختلاف انرژی برای حرکت الکترونها از باند ظرفیتی به تراز پذیرنده، E_a ، به مراتب کمتر از کل شکاف انرژی است. بنابراین الکترونها در مکانهای پذیرنده ساده تر از باند رسانش فعال



شکل ۵-۵-۲ نیمرسانای خارجی (نوع p). اتمهای گروه III یک الکترون ظرفیتی کمتر از چهار الکترون ظرفیتی سیلیسیم که در شکل ۵-۴-۳ دیده می شود، دارند. چنین اتمی می تواند یک الکترون از باند ظرفیتی بپذیرد و بدین ترتیب یک حفره الکترونی به عنوان حامل بار الکتریکی به جا گذارد. انرژی تراز پذیرنده، E_a ، اندکی بالاتر از پایینترین نقطه شکاف انرژی است. (الف) ناخالصی نوع p، مثل آلومینیم (ب) اتم یونیده آلومینیم (الکترون منفی در سمت راست قرار گرفته است) (ج) مدل باند.



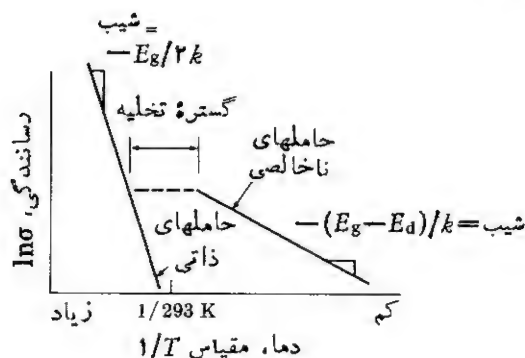
می‌شوند. حفره‌های الکترونی که در باند ظرفیتی باقی می‌مانند برای نیم‌رساناهای نوع p حامل بار مثبت به‌شمار می‌آیند.

تخلیه‌دهنده‌ها (و اشباع‌پذیرنده‌ها). از آنجا که الکترون‌ها برای انتقال به باند رسانش فقط پرش اندکی می‌کنند، در دماهای کم رسانش خادجی آنها آغاز می‌شود. با افزایش دما شیب منحنی آرنیوس، مطابق با سمت راست شکل ۵-۳-۵، برابر $(E_g - E_d)/k$ خواهد بود. اگر تعداد ناخالصیهای دهنده محدود باشد (مثلاً در سیلیسیم 10^{21} P/m^3)، اساساً تمام الکترونهای داده‌شده در زیر دمای معمولی کاربردها، به باند رسانش منتقل می‌شوند. در این صورت تخلیه صورت گرفته است. در مثال فوق در مورد عدد $10^{21} / \text{m}^3$ رسانندگی خارجی برابر است با

$$\sigma_{ex} = (10^{21} / \text{m}^3) (0.16 \times 10^{-18} \text{ A} \cdot \text{sec}) (0.19 \text{ m}^2 / \text{V} \cdot \text{sec})$$

$$= 30 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

رسانندگی خارجی با افزایش بیشتر دما، افزایش بیشتری نمی‌یابد و ناحیه‌ای با رسانندگی ثابت وجود دارد.*



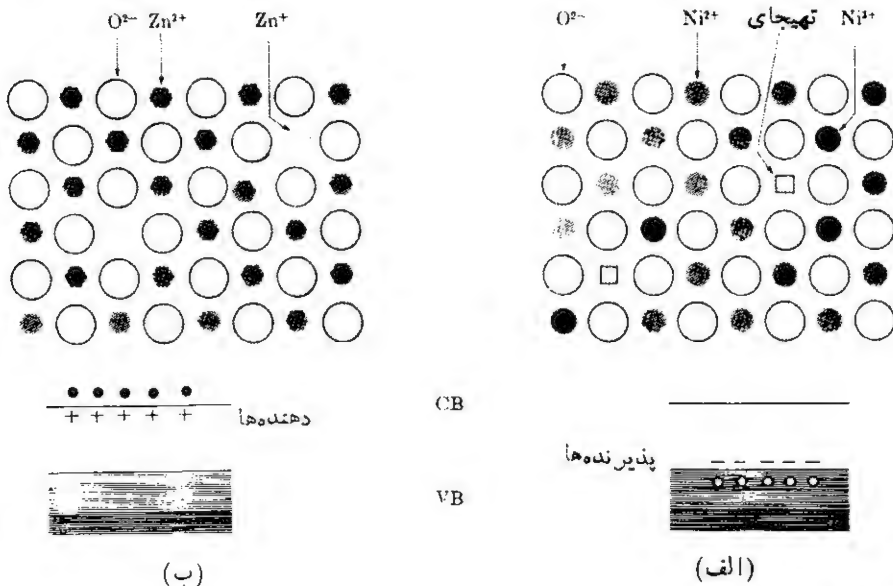
شکل ۵-۳-۵ تخلیه دهنده‌ها. در رسانندگی ذاتی (منحنی سمت چپ) انرژی E_g و در رسانندگی خارجی (منحنی سمت راست) انرژی $E_g - E_d$ لازم است تا الکترون‌ها به باند رسانش منتقل شوند. در دماهای پایین الکترونهای دهنده موجب رسانندگی می‌شوند. تخلیه هنگامی اتفاق می‌افتد که تمام الکترونهای دهنده به باند رسانش رفته باشند و در عین حال دما هنوز آنقدر زیاد نشده باشد که انرژی گرمایی بتواند الکترونهای ظرفیتی را از شکاف انرژی عبور دهد. در این گستره دما رسانندگی تقریباً ثابت است.

* با R ثابت، آزمایشها کاهش اندکی در μ نشان می‌دهند که منشأ آن میانگین مسیر آزاد کوتاه‌تری است که از افزایش دما به وجود می‌آید (بخش ۵-۲).

ضمناً رسانندگی ذاتی در نیمرساناهایی مثل سیلیسیم بسیار کم است (طبق جدول ۴-۵-۱ در 25°C برابر $10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{m}$ است). منحنی آرنیوس مربوط به آن در سمت چپ شکل ۴-۵-۵ با شیب ذاتی $-E_g/2k$ یعنی $-1.1 \text{ eV}/2k$ در 6400 K دیده می‌شود. فقط در دماهای بالاتر کل رسانندگی از حد تخلیه بیشتر خواهد شد (به مثال ۴-۵-۳ رجوع کنید).

تخلیه دهنده‌های نیمرساناهای نوع n نیز مانند اشباع پذیرنده‌ها از نیمرساناهای نوع p است. (پاراگراف قبل را برای مبحث اشباع نیز تکرار کنید.) تخلیه دهنده‌ها و اشباع پذیرنده‌ها برای مهندسان مواد و برق اهمیت بسیار دارد زیرا این حالت موجب به وجود آمدن ناحیه‌ای شده است که در آن رسانندگی ثابت است. یعنی لازم نیست که تغییرات دما را در مدارهای الکتریکی در نظر گیرند. در صورتی که اگر $\log \sigma$ با $1/T$ به صورت خطی صعودی تغییر می‌کرد دما باید در نظر گرفته می‌شد.

□ نیمرساناهای معیوب، اکسید آهن شکل ۴-۳-۲ علاوه بر یون عادی Fe^{2+} ، یون Fe^{3+} نیز دارد. وضعیت مشابهی در اکسید شدن NiO و ایجاد یون Ni^{3+} به وجود می‌آید که در شکل ۴-۵-۵ (الف) دیده می‌شود، و این معمولاً در اکسید فلزات واسطه که ظرفیتهای



شکل ۴-۵-۵ نیمرساناهای معیوب. (الف) Ni_{1-x}O یونهای Ni^{3+} به عنوان پذیرنده الکترون عمل می‌کنند به طوری که در باند ظرفیت حفره الکترونی، \square ، ایجاد می‌شود. (ب) Zn_{1-x}O یونهای Zn^{2+} دهنده الکترون، \bullet ، به باند رسانش هستند به طوری که نیمرسانای نوع n را به وجود می‌آورند.

متعددی دارند اتفاق می افتد. در اکسید نیکل سه یون Ni^{2+} جانشین دو یون Ni^{3+} و یک تهیجای، □، می شوند. به این ترتیب موازنه بار الکتریکی برقرار می شود؛ همچنین نفوذ آسانتر شده قدری رسانندگی یونی به وجود می آید. مهتر آنکه الکترونها می توانند از یک یون Ni^{2+} به ترازهای پذیرش یون Ni^{3+} انتقال یابند. به عکس، حفرة الکترونی هنگامی که به طرف الکتروود منفی در حرکت است از یک یون نیکل به یون دیگر می رود. اکسید نیکل و سایر اکسیدهایی که با فرمول $M_{1-x}O$ نشان داده می شوند و ساختاری معیوب دارند را می توان نیم رسانای نوع p به شمار آورد.

اکسیدهای نوع n نیز وجود دارند. اکسید روی وقتی در محیط احیا کننده قرار گیرد تعدادی از اکسیژنهایش را از دست داده $Zn_{1+y}O$ تولید می کند. البته در این صورت تهیجای اکسیژن به وجود نمی آید بلکه یک یون روی به محل جانشینی می رود [شکل ۵-۵-۲ (ب)]. یونهای Zn^{2+} که برای موازنه بار الکتریکی وارد می شوند از حالت عادی یونهای Zn^{2+} یک الکترون بیشتر، بنابراین الکترونیایی به باند رسانش می دهند تا نیم رسانندگی نوع n ایجاد شود.

مثال ۵-۵-۱ رسانندگی سیلیسیم خالص طبق جدول ۵-۴-۲، $5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ است. برای یک کاربرد مهندسی به آن ناخالصی آلومینیم می افزایند تا رسانندگی آن به $200 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ برسد. تعداد اتمهای آلومینیم در هر متر مکعب چقدر باید باشد؟

حل: از آنجا که رسانندگی ذاتی سیلیسیم در مقایسه با $200 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ قابل اغماض است، می توان فرض کرد که تمام رسانندگی ناشی از حفرة هایی است که از وجود اتمهای پذیرنده ناشی می شوند:

$$n_p = \frac{(200 \Omega^{-1} \cdot m^{-1})}{(0.16 \times 10^{-18} \text{ amp} \cdot \text{sec}) (0.0425 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{sec})}$$

$$= 3 \times 10^{22} / \text{m}^3$$

توضیح. هر اتم آلومینیم یک محل پذیرنده و در نتیجه یک حفرة به وجود می آورد، بنابراین در هر متر مکعب، 3×10^{22} اتم آلومینیم وجود دارد که اگر چه عدد بزرگی است اما در مقایسه با تعداد اتمهای سیلیسیم در هر متر مکعب کوچک است (حدود ۰.۰۶ ppm).
(مسئله ۵-۵-۱ (الف) را ببینید.) ▲

مثال ۵-۵-۲ مقاومت ویژه خارجی ژرمانیم برای نوعی تراز یستور $0.02 \Omega \cdot m$ و تعداد الکترونیهای رسانش در هر متر مکعب 1.5×10^{21} است. الف) تحرك الکترونها در ژرمانیم چقدر است؟ ب) چه عناصری را باید به عنوان ناخالصی به ژرمانیم افزود تا الکترونیهای رسانش تحویل دهند؟

حل: چون رسانندگی خارجی را به الکترونها نسبت داده ایم (یعنی نوع n)

(الف)

$$\mu_n = \frac{1}{(0.02 \Omega \cdot m)(0.87 \times 10^{21} / m^3)(0.16 \times 10^{-18} \text{ amp} \cdot \text{sec})}$$

$$= 0.36 m^2 / V \cdot \text{sec}$$

(ب) گروه V عناصر: N, P, As, Sb

توضیح. توجه داشته باشید که تحرك الكترونها به اینكه کداميك از عناصر گروه V افزوده شده‌اند بستگی ندارد زیرا الكترون پس از رسیدن به باند رسانش در شبکه بلوری سیلیسیم، مستقل از دهنده خود، حرکت می‌کند.

اگر عناصر گروه VI اضافه شوند در هر مترمکعب تنها $10^{21} \times 0.02$ اتم برای ایجاد $10^{21} / m^3 \times 0.8$ الكترون، کافی خواهد بود زیرا اتم دوالكترون اضافی بدغیر از چهار الكترون لازم برای پیوند وارد عمل می‌کند. ▲

مثال ۳-۵-۵ میزان فسفر باقیمانده در سیلیسیم خالص 0.1 در هر بیلیون است (نسبت وزنی). آیا رسانندگی حاصل، از رسانندگی ذاتی سیلیسیم بیشتر است؟

حل: براساس چگالی (پیوست ب):

$$\rho_{Si} = 2.33 \times 10^6 \text{ gSi} = 2.33 \times 10^{-4} \text{ gP}$$

$$(2.33 \times 10^{-4} \text{ g} / m^3) / (3.097 \text{ g} / 0.6 \times 10^{24}) = 4.5 \times 10^{18} / m^3$$

$$\sigma_{ex} = (4.5 \times 10^{18} / m^3)(0.16 \times 10^{-18} \text{ amp} \cdot \text{sec})(0.19 m^2 / V \cdot s)$$

$$= 0.14 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$$

درمقابل

$$\sigma_{in} = 5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot m^{-1} \quad (\text{از جدول ۲-۴-۵})$$

توضیح. برای رسیدن به ناخالصی کمی که برای تولید نیمرسانندگی لازم است، به روشهای تولید کاملاً جدیدی نیاز بود. ▲

مثال ۴-۵-۵ در سیلیسیم برای تولید نیمرسانای نوع p، $Al / m^3 \times 10^{22}$ وجود دارد. در چه دمایی رسانندگی ذاتی سیلیسیم برابر بیشینه رسانندگی خارجی خواهد بود؟

حل: در حالت اشباع

$$\sigma_{ex} = (10^{22} / m^3)(0.16 \times 10^{-18} A \cdot \text{sec})(0.0225 m^2 / V \cdot \text{sec})$$

$$= 68 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$$

$$\sigma_{in} = 5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot m^{-1} \quad \text{در } 20^\circ C, \text{ از جدول ۲-۴-۵}$$

$$\frac{5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}}{68 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}} = \frac{\sigma_0 e^{-101/2k(293\text{K})}}{\sigma_0 e^{-101/2kT}} \quad \text{رابطه (۳-۴-۵)}$$

$$\ln\left(\frac{5 \times 10^{-4}}{68}\right) = -101.8 = \frac{-101 \text{ eV}}{2(8611 \times 10^{-6} \text{ eV/K})} \left[\frac{1}{293 \text{ K}} - \frac{1}{T} \right]$$

$$T = 640 \text{ K} \quad (\text{یا } 367^\circ\text{C})$$

توضیح. کلیترین رابطه رسانندگی در نیمرساناها رابطه زیر است

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{in} + (\sigma_n)_{ex} + (\sigma_p)_{ex} \\ &= (n_{in}q)(\mu_n + \mu_p) + (n_p q \mu_n)_{ex} + (n_p q \mu_p)_{ex} \quad (1-5-5) \end{aligned}$$

کلا در هر مورد فقط یکی از سه عبارت بامعنی است، و بقیه قابل اغماض اند. در این مثال فقط $(\sigma_p)_{ex}$ در 20°C بامعنی است. ▲

□ ۵-۶ وسایل نیمرسانا

در ساختن بسیاری از وسایل الکترونیکی از نیمرساناها استفاده شده است و در اینجا تنها به چند نمونه آن اشاره می‌شود.

وسایل رسانش و مقاومت. قبلاً دیدیم که رسانندگی يك دسانای نودی مستقیماً با مقدار نور برخوردکننده با آن، تغییر خواهد کرد. این خاصیت موجب به وجود آمدن وسایل حساس به نور شده است. تابش حتماً نباید مرئی باشد، نور فرابنفش یا فروسرخ نیز می‌تواند فوتونی تأمین کند که انرژی آن بیشتر یا مساوی شکاف انرژی باشد. وسیله دوم ترمیستود است. این وسیله نیمرسانایی است که مقاومت آن بر حسب دما مدرج شده است. اگر شکاف انرژی بزرگ باشد به طوری که منحنی $\ln \sigma$ بر حسب $1/T$ شیب زیادی داشته باشد، می‌توان ترمیستوری طراحی کرد که تغییرات دما را تا 10^{-4} تا 10^{-2}°C نشان دهد.

از آنجا که بسیاری از وسایل نیمرسانا ضریب فشردگی پایینی دارند خاصیت تراکم‌پذیری آنها زیاد است. آزمایش نشان می‌دهد که با کم شدن حجم، اندازه شکاف انرژی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. بدیهی است که در این صورت تعداد الکترونهايي که می‌توانند از شکاف انرژی، پرش کنند زیاد می‌شود. به این ترتیب با مدرج کردن فشار در مقابل مقاومت، می‌توان فشارسنج ساخت.

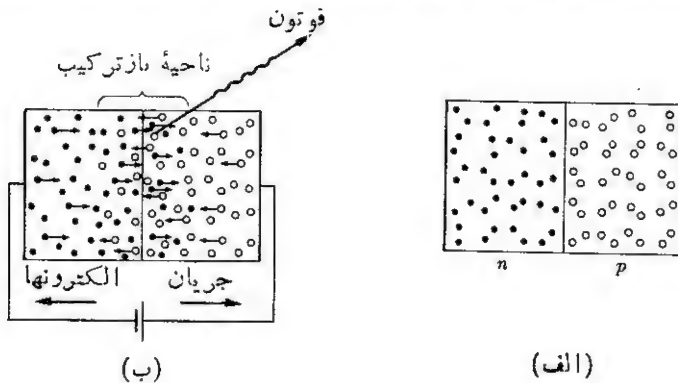
وسیله تقویت نور از فعالسازی الکترون، در درجه اول توسط فوتونها و بعد توسط خود الکترونها، استفاده می‌کند. مثلاً فرض کنید که منبع نور بسیار ضعیفی، حتی فقط يك فوتون، به الکترون ظرفیتی برخورد کند. چشم نمی‌تواند آن را ببیند. ولی اگر این

الکترون تا باند رسانش بالا رود و همزمان با آن نیمرسانا در میدان الکتریکی بسیار قوی قرار گیرد، آن الکترون تا سرعتهای بسیار بالایی شتاب می‌گیرد و انرژی بسیاری به دست می‌آورد و به نوبه خود می‌تواند يك یا چند الکترون دیگر را که آنها نیز تحت تأثیر میدان قوی اند فعال کند. از اثر تقویت کننده می‌توان استفاده کرد و سیگنال نوری بسیار ضعیف را تقویت کرد. با تمرکز نور، تصویری را که تقریباً به طور کامل تاریک است می‌توان به صورت مرئی درآورد.

وسایل پیوندی (دیودها). وسایلی اند که از خاصیت پیوند بین نیمرساناهای نوع n و نوع p استفاده می‌کنند. معروفترین آنها دیودهای خودگسیل (LED) است. کاربرد آنها را در قسمت نمایش دهنده عدد (قرمز رنگ) در ماشینهای حساب دستی می‌بینیم. کار LED بر اساسی استوار است که طرحواره آن در شکل ۵-۶-۱ دیده می‌شود. حاملهای بار الکتریکی در طرف n و در طرف p پیوندگاه به ترتیب الکترونها و حفرهها هستند. اگر جریان از وسیله‌ای در جهت نشان داده شده بگذرد، حفرههای باند ظرفیتی از پیوندگاه عبور کرده و به طرف ماده نوع n حرکت می‌کنند؛ برعکس، الکترونهای باند رسانش به طرف ماده نوع p حرکت می‌کنند. در مجاورت پیوندگاه حاملهای اضافی وجود دارد که باز ترکیب شده، لیانی به وجود می‌آورند:



اگر از GaAs استفاده شود، فوتونهای گسیل شده در ناحیهٔ بساز ترکیب، قرمزند؛ GaP

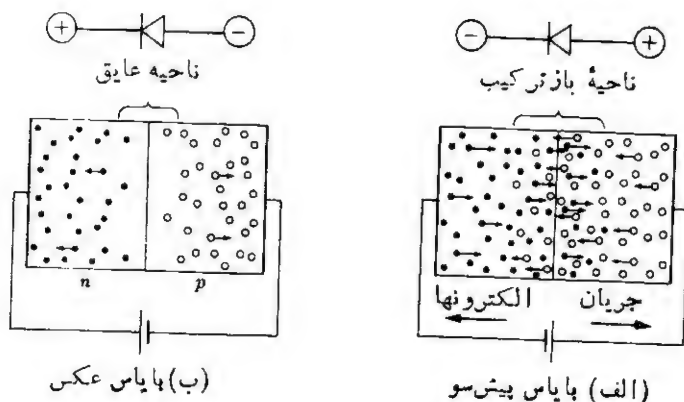


شکل ۵-۶-۱ دیود نورگسیل (طرحواره). الف) LED وسیلهٔ پیوندی است بین نیمرساناهای نوع n و نوع p ؛ ب) وقتی بسایس پیشرو در پیوندگاه برقرار می‌شود، حاملهای هر دو نوع از پیوندگاه عبور کرده در آنجا باز ترکیب می‌شوند، در نتیجه از خود فوتون گسیل می‌کنند [را بطة (۵-۴-۴) و (۵-۴-۶)].

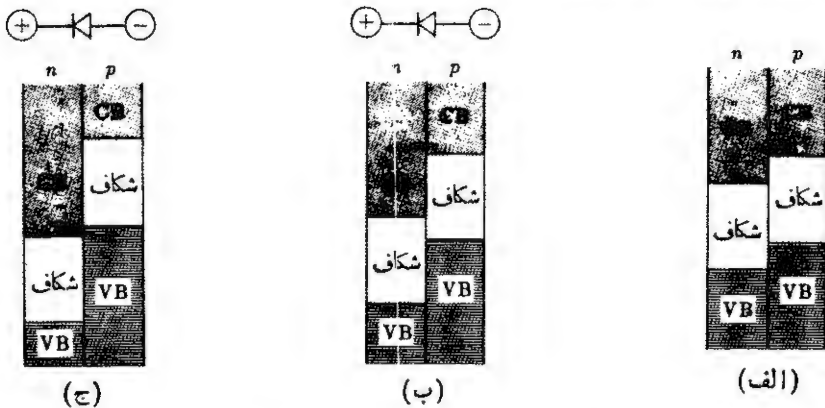
فوتونهای سبز می‌دهد.

پیوندگاه شکل ۵-۶-۱ نیز می‌تواند به صورت یکسوکننده عمل کند؛ یعنی «شیر یکطرفه» الکتریکی است که فقط اجازه می‌دهد جریان یکطرف عبور کند و به طرف دیگر اجازه عبور نمی‌دهد. شکل ۵-۶-۲ مفهوم شکل ۵-۶-۱ را با دادن ولتاژی در جهت عکس یا بایاس بسط می‌دهد. در شکل ۵-۶-۲ (ب) حاملها از هر طرف کشیده می‌شوند تا «ناحیه عایق» بدون حاملی در محل پیوندگاه به وجود آید. رسانندگی این ناحیه پایین است. اگر ولتاژ بیشتری اعمال شود، ناحیه عایق به آسانی وسیعتر می‌شود. جریان قابل استفاده فقط با بایاس پیش‌سو عبور می‌کند [شکل ۵-۶-۲ (الف)].

پیوندگاه شکل ۵-۶-۲ (ب) با افزایش ولتاژ تا نقطه‌ای فقط جریان بسیار جزئی را عبور می‌دهد. اگر بایاس اولیه به حد کافی بالا باشد و عکس شود، بالای باند ظرفیتی در ماده نوع p ممکن است بالاتر از پایین باند رسانش در ماده نوع n قرار گیرد و در نتیجه الکترونهای باند ظرفیتی بتوانند از p به طرف n عبور کنند (شکل ۵-۶-۳). با چنین ولتاژی جریان عکس ممکن است بسیار بالا باشد. بنابراین شیری داریم که در ولتاژ معینی باز می‌شود. سیلیسیم کربید (SiC) ماده جدیدی است که از آن بدین طریق در متوقف‌کننده‌های نوری استفاده می‌شود. اندازه شکاف انرژی آن، از این ماده رسانای بسیار ضعیفی ساخته است، بجز وقتی که تحت نور بسیار شدید قرار می‌گیرد. در آن ولتاژ، جریان به زمین انتقال می‌یابد. پس از اتصال به زمین بار دیگر به صورت عایق در می‌آید. این ماده «شیر اطمینان» الکتریکی است.



شکل ۵-۶-۲ یکسوکننده (طرحواره). (الف) جریان توسط بایاس پیش‌سو حرکت می‌کند زیرا حاملهای بار الکتریکی از پیوندگاه عبور می‌کنند؛ (ب) با بایاس معکوس، ناحیه پیوندگاه از حاملهای بار تخلیه می‌شود، رسانندگی خارجی در پیوندگاه از بین می‌رود و فقط مقدار کمی رسانندگی ذاتی باقی می‌ماند.



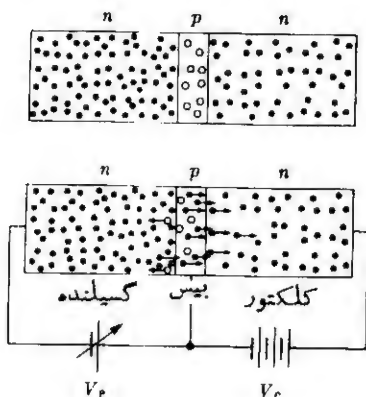
شکل ۵-۶-۳ دیود زنر (طرحسازه). بایاس عکس، شکاف سمت n پیوندگاه را کم می‌کند و شکاف سمت p پیوندگاه را افزایش می‌دهد. جریان اندکی در قسمتهای (الف) و (ب) به وجود می‌آید زیرا الکترونها کمی در باند رسانش (CB) سمت p وجود دارند که به عنوان حامل عمل می‌کنند؛ (ج) وقتی بایاس به حد کافی زیاد شود، بهمنی از الکترونها می‌توانند مستقیماً از باند ظرفیتی (VB) سمت p پیوندگاه به باند رسانش سمت n حرکت کنند، اگر بایاس معکوس کاهش یابد و وضعیت به حالت (ب) و (الف) برگردد جریان قابل اغماضی عبور می‌کند. این شکست ولتاژ را می‌توان با کنترل ترازهای داخلی عمداً انجام داد.

دیودها، طبق اصول فوق، ممکن است برای انواع مختلف ولتاژهای شکست در گستره هزارها تا چند ولت طراحی شوند. این وسایل کم ولتاژ که دیودهای زنر نامیده می‌شوند به طور سودمندی به عنوان گیت و فیلتر در مدارهای الکتریکی به کار می‌روند.

ترانزیستورها. همچنان که حفزه توسط بایاس پیش سو [شکل ۵-۶-۱ (ب)]، از پیوندگاه عبور می‌کنند با الکترونهای ماده نوع n طبق رابطه (۵-۴-۴، ب) باز ترکیب می‌شوند به همین ترتیب، الکترونها با حرکت به سمت ماده نوع p با حفزه‌ها ترکیب می‌شوند. ولی این واکنشها بیدرنگ انجام نمی‌گیرد. در حقیقت تعداد زیادی حاملهای مثبت و منفی تا فواصل مشخصی بعد از پیوندگاه حرکت می‌کنند. تعداد حاملهای اضافی باز ترکیب نشده تابعی از ولتاژ اعمال شده V است و برای ترانزیستورها اهمیت دارد.

ترانزیستور در طرحهای مهندسی انقباضی پدید آورده است. کار آن را می‌توان با مدل ساده‌ای شرح داد. ترانزیستور از دو پیوندگاه سری تشکیل شده است. این پیوندگاهها ممکن است به صورت $p-n-p$ یا $n-p-n$ باشند که در گذشته اولی تا اندازه‌ای متداولتر بوده است. ما به توضیح عمل ترانزیستور $n-p-n$ می‌پردازیم زیرا حرکت الکترونها نسبت به حرکت حفزه‌ها قابل تصورتر است. به هر حال اصول کار هر دو نوع مشابه است.

ترانزیستور به طور کلی از سه قسمت گسیلنده (امیتر)، بیس (پایه) و کلکتور (گردآور) تشکیل شده است (شکل ۵-۶-۴). ابتدا پیوندگاه گسیلنده را در نظر بگیرید که الکترونها



شکل ۵-۶-۴ ترانزیستور ($n - p - n$)
تعداد الکترونهايي که از پیوندگاه گسیلنده-
بیس ($n - p$) می گذرند نسبت به ولتاژ
گسیلنده فوق العاده حساس است. اگر ناحیه
بیس باریک باشد این حاملهای بار به طرف
پیوندگاه بیس-کلکتور حرکت می کنند سپس
با یکدیگر باز ترکیب می شوند. هرگاه ولتاژ
گسیلنده تغییر کند کل جریان گسیلنده به
بیس به میزان زیادی تقویت خواهد شد.

از آن به ناحیه «بیس» (و از آنجا به طرف کلکتور) می روند. همان طور که قبلاً گفته شد
تعداد الکترونهايي که از این پیوندگاه گذشته و به طرف ماده نوع p می روند تابعی نمایی
از ولتاژ گسیلنده (V_e) است. اگر چه این الکترونها از ابتدا در «بیس» شروع به
ترکیب شدن با حفره ها می کنند، اما اگر ناحیه «بیس» باریک یا زمان باز ترکیب τ در
رابطه (۵-۴-۵) زیاد باشد، الکترونها ضخامت «بیس» را طی کرده به پیوندگاه کلکتور
می رسند و از آنجا نیز آزادانه عبور می کنند زیرا کلکتور خود یک نیم رسانای نوع n
است. کل جریانی که از کلکتور می گذرد به وسیله ولتاژ گسیلنده، V_e ، کنترل می شود.
هرگاه ولتاژ «گسیلنده» (V_e) تغییر کند جریان در کلکتور، I_c ، به طور نمایی تغییر خواهد
کرد و رابطه لگاریتمی زیر برقرار است

$$\ln I_c \simeq \ln I_0 + \frac{V_e}{B} \quad (۵-۶-۱، الف)$$

یا

$$I_c = I_0 e^{V_e/B} \quad (۵-۶-۱، ب)$$

در این رابطه برای هر دمای معلوم، I_0 و B مقادیر ثابتی اند. به این ترتیب هرگاه ولتاژ
گسیلنده حتی به مقدار اندکی افزایش یابد مقدار جریان به میزان زیادی بالا خواهد
رفت، و به همین دلیل است که ترانزیستور می تواند به عنوان تقویت کننده مورد استفاده
قرار گیرد.

مثال ۵-۶-۱ روی سولفید به عنوان ترمیستور به کار می رود. برای نشان دادن تغییر
 100°C در 20°C ، مقاومت باید تا چه درجه حساسیتی، δ ، اندازه گیری شود؟

حل: از آنجا که شکل هندسی ثابت است

$$\delta = \frac{R_1 - R_2}{R_1} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

$$1 - \delta = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left[\frac{\sigma_0 e^{-3.7 \text{ eV}/kT}}{\sigma_0 e^{-3.7 \text{ eV}/k(T+5000)}} \right]$$

$$\ln(1 - \delta) = \frac{-3.7 \text{ eV}}{2(8601 \times 10^{-6} \text{ eV/K})} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T+10^{-3}} \right]$$

از آنجا که

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T+10^{-3}} = \frac{(T+10^{-3}) - T}{T(T+10^{-3})} = \sim \frac{10^{-3}}{T^2}$$

$$\ln(1 - \delta) = (-21500 \text{ K}) \left(\frac{10^{-3} \text{ K}}{(293 \text{ K})^2} \right)$$

$$= -2.5 \times 10^{-4}$$

$$\delta = 0.00025 \quad (\text{یا } 0.025\%)$$

توضیح. دستگاه پل مانندی لازم خواهد بود. ▲

مثال ۵-۶-۲ در ترانزیستوری، وقتی ولتاژ گسیلنده ۱۷ میلی‌ولت باشد، جریان ۴۷۷ میلی‌آمپر است. در ولتاژ ۲۸ mV جریان به ۲۷۷۵ mA می‌رسد. جریان کلکتور را وقتی که ولتاژ ۳۹ mV می‌شود حساب کنید.

حل: با استفاده از رابطه (۵-۶-۱)

$$\ln 477 \approx \ln I_0 + \frac{17}{B} = 1.55$$

$$\ln 2775 \approx \ln I_0 + \frac{28}{B} = 3.31$$

با منفرجه دو رابطه فوق و استفاده از واحدهای یک‌هزارم، داریم

$$B \approx 6.25 \quad \text{و} \quad \ln I_0 \approx -1.17$$

در ۳۹ میلی‌ولت،

$$\ln I_c \approx -1.17 + \frac{39}{6.25} \approx 5.07$$

$$I_c \approx 160 \text{ میلی‌آمپر}$$

توضیح. برای کنترل آثار اضافه جریان، مهندسان برق رابطه (۵-۶-۱) را اصلاح می کنند. ولی روابط اساسی را تغییر نمی دهند: تغییر جریان کلکتور خیلی بیشتر از تغییر ولتاژ سیگنال است.

مرور و بررسی مطالب

خلاصه

در مقایسه با فصل سوم که به نظم اتمی و فصل چهارم که به بی نظمیها و نواقص بلوری اختصاص داشت، این فصل بیشتر به الکترونها و آزادی حرکت آنها در بین اتمها پرداخته است. در فلزات بار الکتریکی به وسیله الکترونها حمل می شود ($q = 0.16 \times 10^{-18} \text{ coul}$)، در مواد یونی بار به وسیله آنیونها (که اتمهایی با الکترون اضافی اند) یا کاتیونها، که کمبود الکترون دارند حمل می شود. در نیم رساناها حمل بار به وسیله الکترونها و حفره ها مشترکاً صورت می گیرد. حفره های الکترونی حامل بار مثبت اند که با کاتیونها قابل مقایسه اند.

فلزات باند های انرژی ظرفیتی پر نشده دارند، در حالی که هم در عایقها و هم در نیم رساناها باند های ظرفیتی پرند. البته در نیم رساناها شکاف موجود به اندازه ای کوچک است که الکترونها می توانند با گرفتن انرژی به باند رسانش برسند.

از آنجا که در فلزات تعداد زیادی الکترون برای رسانندگی وجود دارد، رسانندگی در آنها اساساً به وسیله حرکت الکترونها به وجود می آید و هر عامل دیگری از قبیل ارتعاشات گرمایی یا ناخالصی، که از عیوب بلوری است، میانگین مسیر آزاد الکترونها را کم می کند و بنابراین سبب کاهش رسانندگی (و افزایش مقاومت ویژه) می شود.

نیم رساناها به طور عمده به دو دسته «ذاتی» و «خارجی» تقسیم می شوند. دسته اول خاصیت رسانندگی را به وسیله فعال سازی الکترونها و عبور آنها از شکاف انرژی به دست می آورند و مستقل از وجود ناخالصیها یند. در این مورد نوسانات گرمایی بیش از همه معمول است. از آنجا که تعداد حامل های بار مطابق با تابعی نمایی از دما زیاد می شود، تغییر مقدار n در رابطه (۵-۴-۱) اثر دما روی تحرک حاملها را تحت الشعاع قرار خواهد داد.

الکترونها را می توان علاوه بر گرما به وسیله تابش نور یا اشعه های دیگر نیز فعال کرد و به باند رسانش رساند. هر الکترون فعال شده در نیم رسانای ذاتی يك حفره به جا می گذارد و به این ترتیب جفت های الکترون - حفره، مشترکاً به ایجاد رسانندگی کمک می کنند. به طور کلی تحرک الکترونها در باند رسانش از تحرک حفره ها در باند ظرفیتی بیشتر است. وسایلی مثل ترمیستورها و رسانا های نوری از رسانندگی ذاتی ناشی از فعال سازی الکترون و عبور آن از شکاف انرژی استفاده می کنند.

نیم رسانا های خارجی رسانندگی را (۱) از ناخالصیهایی که به باند رسانش (نوع n) الکترون می دهند، یا (۲) از ناخالصیهایی که از باند ظرفیتی (نوع p) الکترون می پذیرند، به دست می آورند. سیلیسیم و عناصر مشابه گروه IV با افزودن عناصر گروه V (یا VI)

نیمرسانای نوع n و با افزودن عناصر گروه III (یا II) نیمرسانای نوع p به شمار می آیند. نیمرساناهای خارجی به مهندسان مواد و برق امکان می دهند که وسایل اتصال مختلفی طراحی کنند. یکسوکننده ها و ترانزیستورها دو نمونه از این وسایل اند. نیمرساناهای معیوب دسته خاصی از نیمرساناهای خارجی اند که از ناستوکیومتری در یونهای چند ظرفیتی ناشی می شوند. به این طریق، تعداد زیادی از اکسیدهای فلزی خواهند توانست مانند رساناهای نوع n یا نوع p عمل کنند.

سؤالات تشریحی

۱. انواع مختلف حاملهای بار را شرح دهید و مقایسه کنید.
۲. عوامل مختلفی را که روی سرعت رانش الکترونها در جامدات اثر می گذارد شرح دهید.
۳. مکانیسم رسانندگی در بعضی موارد با نفوذپذیری ارتباط دارد زیرا با فرایندهای انتقال سروکار داریم. بر اساس واحدهای آنها وجوه تشابه و تفاوت های بین تحرک و نفوذپذیری را ذکر کنید.
۴. چرا مقاومت ویژه برنج بیشتر از مس است؟
۵. چرا رسانندگی فلزات در دماهای بالا کاهش می یابد؟
۶. چرا رسانندگی نیمرساناها در دمای بالا افزایش می یابد؟
۷. شرح دهید که چرا انرژیهای برای الکترونها ی مربوط به اتمهای تنها، ممنوع است؟
۸. تفاوت بین رساناهای فلزی، عایقها و نیمرساناها را شرح دهید.
۹. فرض کنید که باندهای اول منیزیم همپوشانی نداشته باشند، خواص منیزیم (الف) در صورتی که شکاف کمتر از 1 eV شود چه تغییری می کند؟ (ب) در صورتی که بزرگتر از 4 eV شود چه تغییری می کند؟
۱۰. جابجی از لوله آب عمودی بالایی آید. تشابهی بین آن و حفرة الکترونی بر حسب میدان نیرو و جهت انتقال نشان دهید.
۱۱. تفاوت بین نیمرساناهای ذاتی و خارجی را بنویسید.
۱۲. حدس بزنید که آیا بورنیتريد با ساختار شکل ۳-۴-۵ (ب)، عایق خواهد بود یا نیمرسانا.
۱۳. طرز کار چشم الکتریکی را شرح دهید.
۱۴. چه کسری از الکترونها پس از $t = \tau$ در باند رسانش باقی می ماند؟ پس از $t = 2\tau$ چطور؟
۱۵. □ تفاوت بین فلوئورسانی و فسفرسانی را ذکر کنید.
۱۶. ZnS ساختاری شبیه به آنچه که در شکل ۳-۴-۵ (ب) دیده می شود دارد. فرض کنید مقداری اتم فسفر به جای اتمهای گوگرد قرار گرفته است. ترکیب حاصل، از نوع n است یا نوع p ؟

۱۷. فرق بین نیم رسانندگی نوع n و نوع p را ذکر کنید.
۱۸. فرق بین ناخالصیهای پذیرنده و دهنده را شرح دهید.
۱۹. چرا شیب منحنی مربوط به حاملهای ذاتی در شکل ۵-۵-۳ تندتر از منحنی مربوط به حاملهای ناخالصی است؟
۲۰. مکانیسم اشباع پذیرندهها را طبق شکل ۵-۵-۳ به تفصیل شرح دهید.
۲۱. 10^{11} اتم منیزیم جانشین همین تعداد اتم سیلیسیم در یک میلی متر مکعب سیلیسیم شده است. مقایسه کنید که اگر 10^{11} اتم ناخالصی آلومینیم در آن وجود داشت، در رسانندگی چه تغییری حاصل می شود؟
۲۲. میانگین مسیر آزاد الکترونها در نیم رساناها در دمای بالا کاهش می یابد. ولی این اثر دما روی رسانندگی فقط در گستره تخلیه (یا اشباع) مشاهده می شود. چرا؟
۲۳. \square Cu_2O به طور کلی حاوی یون Cu^+ است، ولی مقداری Cu^{2+} نیز در آن موجود است. این ترکیب از نوع n است یا نوع p ؟
۲۴. \square اصول دیود نور گسیل را شرح دهید.
۲۵. \square طرز کار یکسو کننده سیلیسیمی را شرح دهید.
۲۶. \square اصول لوله تقویت کننده نور را شرح دهید.

مسائل

- ۵-۱-۱ به نیم رسانایی به بعد 5 mm ، ولتاژ 70 V اعمال شده است. حرکت حامل $23\text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ است. سرعت رانش چقدر است؟
جواب: 32 m/sec
- ۵-۱-۲ نیم رسانایی دارای مقاومت ویژه $0.313\text{ m}\cdot\Omega$ است. اگر به قطعه 9 m متری آن $1/2$ ولت اعمال شود، سرعت رانش 7 m/sec خواهد بود. در هر متر مکعب آن چند حامل وجود دارد؟
- ۵-۱-۳ آزمایش تجربی سرعت رانش الکترونها را در یک نیم رسانا 149 m/sec نشان داده است، به شرط آنکه گرادیان ولتاژ 15 V/mm باشد. مقاومت ویژه $0.7\text{ m}\cdot\Omega$ است. غلظت حاملها چقدر است؟
جواب: $9 \times 10^{21}/\text{m}^3$
- ۵-۱-۴ فلاشی اگر در باتری ۲ سلولسی به کار رود، مقاومتی برابر ۵ اهم دارد. فرض کنید ولتاژ ۳ ولت است. در هر دقیقه چند الکترون از این رشته عبور می کند؟
- ۵-۲-۱ دمایی را که در آن مقاومت ویژه نقره $10\text{ nm}\cdot\Omega$ است معین کنید.
جواب: 88°C

۲-۲-۵ در چه دمایی نقره همان مقاومت ویژه طلا در 50°C را دارد؟

۳-۲-۵ مقاومت ویژه مس بین 20°C و 300°C دوبرابر می‌شود. در چه دمایی مقاومت ویژه آلومینیم برابر بیشترین مقاومت ویژه مس می‌شود؟
جواب: 70°C

۴-۲-۵ بر اساس داده‌های جدول ۱-۲-۵ پیوست ج، اثر مس را روی مقاومت ویژه نقره ($\Omega \cdot \text{nm}$ بر a/o) تخمین بزنید.

۵-۲-۵ بر اساس داده‌های مثال ۲-۲-۵، مقاومت ویژه مغرغ $95\text{ Cu}-5\text{ Sn}$ (به صورت وزنی) را در 50°C تخمین بزنید.
جواب: $97 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} (= 97 \Omega \cdot \text{nm})$

۶-۲-۵ برای مقاومت بین 50°C و 25°C ، حداکثر % تغییر مجاز است. کدامیک از فلزات جدول ۱-۲-۵ این ویژگی را دارد؟

۷-۲-۵ به سیمی آهنی (به طول 1.07 m و قطر 5.3 mm) در 25°C ، 25 ولت اعمال شده است. الف) آمپر اولیه چقدر است؟ در 910°C ، درست زیر دمای تبدیل $\text{bcc} \leftrightarrow \text{fcc}$ آمپر چقدر است؟ ب) تغییر طول تقریبی بین 20°C و 910°C چقدر است؟ بین 20°C و 915°C چطور؟ (مثال ۱-۲-۳ را مرور کنید. ضریب انبساط گرمایی آهن bcc مستقیماً به تغییر شعاع مربوط خواهد بود.)

جواب: الف) 53 A ، 11 A ؛ ب) 16 mm ، 11 mm . (از این مسئله برای سؤال تشریحی ۲۲ مربوط به فصل ۹ استفاده کنید.)

۸-۴-۵ ذره‌ای از سیلیسیم دارای ابعاد $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ است. اگر ولتاژ اعمال شده بر آن، 37 میلی ولت باشد، سرعت رانش الکترون‌ها از میان بعد کوتاه‌تر چقدر خواهد بود؟

جواب: 70 m/sec

۹-۴-۵ ژرمانیم خالص دارای رسانندگی $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{m}$ است. تعداد حامل‌های منفی، n_n ، و حامل‌های مثبت، n_p ، مساوی است. چه کسری از رسانندگی به سبب الکترون‌ها و چه کسری به سبب حفره‌های الکترونی است؟

۱۰-۴-۵ چه کسری از بار توسط حفره‌های الکترونی گالیوم آرسنید (GaAs) که نیم رسانای ذاتی است حمل می‌شود؟

جواب: 0.43 (یا 43%)

۱۱-۴-۵ برای آنکه رسانندگی نیم رسانای ذاتی سیلیسیم به $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{m}$ برسد،

چه تعداد حامل الکترونی (و حفره الکترونی) لازم است؟

۵-۴-۵ مقاومت ویژه نیم رسانایی که در هر متر مکعب 10^{21} بار منفی (و تعداد کمی بار مثبت) دارد، $0.016 \Omega \cdot m$ است. الف) رسانندگی چقدر است؟ ب) تحرک الکترون چقدر است؟ ج) اگر گرادیان پتانسیل 5 mV/mm باشد سرعت رانش چقدر است؟ در صورتی که 5 V/m باشد چطور؟

جواب: الف) $1.0 \cdot m^{-1} \cdot \Omega^{-1} \cdot sec$ ؛ ب) $0.39 \text{ m}^2/V \cdot sec$ ؛ ج) 1.95 m/sec
 0.195 m/sec

۵-۴-۶ بر اساس داده‌های جدول ۵-۴-۲ کدامیک بیشتر است: ۱) رسانندگی حاصل از الکترون‌ها در نیم رسانای ذاتی Inp، یا ۲) رسانندگی حفره‌های نیم رسانای ذاتی InAs؟
 ۵-۴-۷ سیلیسیم خالص در هر سلول واحد 32 الکترون ظرفیتی دارد (۸ اتم هر کدام 4 الکترون). مقاومت ویژه آن $0.010 \times 10^2 \Omega \cdot m$ است. چه کسری از الکترون‌های ظرفیتی رسانا می‌شوند.

جواب: یکی از $10^{12} \times 10^{15}$

۵-۴-۸ در دمایی بالا، از هر 10^9 الکترون ظرفیتی ژرمانیم یکی در رساند رسانش قرار دارد. رسانندگی چقدر است؟ (ژرمانیم همان ساختار سیلیسیم را دارد، ولی با $\alpha = 0.566 \text{ nm}$).

۵-۴-۹ تحرک الکترون‌ها در سیلیسیم $0.19 \text{ m}^2/V \cdot sec$ است. الف) برای اینکه سرعت رانش الکترون‌هایی که از ذره 2 میلی متری Si عبور می‌کنند، 7 m/sec باشد، ولتاژ لازم چقدر است؟ ب) غلظت الکترونی در باند رسانش چقدر باید باشد تا از حامل‌های بار منفی رسانندگی $1.0 \cdot m^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ ایجاد شود؟ ج) اگر ناخالصی وجود نداشته باشد، کل رسانندگی این سیلیسیم چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) 7.4 mV ؛ ب) $10^{20} \times 10^{20} / m^3$ ؛ ج) $1.0 \cdot m^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ ؛ د) 2.4×10^{20} .

۵-۴-۱۰ رسانندگی سیلیسیم در 20°C (68°F)، برابر $1.0 \cdot m^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ است. رسانندگی آن را در 30°C تخمین بزنید.

۵-۴-۱۱ برای آنکه مقدار رسانندگی ژرمانیم در 20°C (68°F) با ضریب دو کاهش یابد، تاجه دمایی باید آن را سرد کرد؟

جواب: 6°C

۵-۴-۱۲ نیم رسانایی در 20°C دارای رسانندگی $1.0 \cdot m^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ و در 60°C دارای رسانندگی $1.0 \cdot m^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ است. اندازه شکاف انرژی چقدر است؟

۱۳-۴-۵ نیم رسانایی ذاتی در 10°C دارای رسانندگی $1.11 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ و در 17°C دارای رسانندگی $1.72 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ است. الف) شکاف انرژی چقدر است؟ ب) رسانندگی در 135°C چقدر است؟

جواب: الف) 0.88 eV ؛ ب) $1.38 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$.

۱۴-۴-۵ نیم رسانایی ذاتی در 5°C دارای رسانندگی $3.90 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ و در 25°C دارای رسانندگی $1.01 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ است. الف) اندازه شکاف انرژی چقدر است؟ ب) رسانندگی در 15°C چقدر است؟

□ ۱۵-۴-۵ با مراجعه به مثال ۵-۴-۵، فرض کنید سفر بازمان بازترکیب 0.04 sec به کار رفته است. وقتی تصویر بعدی دیده می شود چه کسری از شدت نور باقی مانده است؟

جواب: ۰.۲۲

□ ۱۶-۴-۵ ماده فسفرسانی در معرض نور فرابنفش قرار گرفته است. شدت نور گسیل شده در ۳۷ دقیقه اول پس از برداشتن نور فرابنفش ۲۰٪ کاهش می یابد. الف) از زمان برداشتن نور فرابنفش چه مدتی طول می کشد تا نور منتشر شده به ۲۰٪ شدت اولیه خود برسد (یعنی ۸۰٪ کاهش یابد)؟ ب) برای فقط ۱٪ شدت اولیه چطور؟

۱۷-۴-۵ ماده فسفرسانی باید پس از ۲۴ ساعت، شدت ۵۰ (با واحد اختیاری) را داشته باشد و پس از ۴۸ ساعت این شدت به ۲۰ برسد. بر اساس این ارقام، شدت اولیه چقدر باید باشد؟ (بدون ماشین حساب حل کنید)

جواب: ۱۲۵

۱۸-۴-۵ زمان بازترکیب ماده را در مسئله قبل با استفاده از ماشین حساب به دست آورید.

۱۹-۵-۵ سیلیسیم دارای چگالی $2.33 \text{ Mg/m}^3 (= 2.33 \text{ g/cm}^3)$ است. الف) غلظت اتمهای سیلیسیم در هر متر مکعب چقدر است؟ ب) برای تبدیل سیلیسیم به نیم رسانای نوع n با رسانندگی 100 mho/m و تحرک الکترونی $0.19 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ ، سفر به آن اضافه شده است. در هر متر مکعب غلظت الکترونهای دهنده چقدر است؟

جواب: الف) $5 \times 10^{28} \text{ Si/m}^3$ ؛ ب) $3.3 \times 10^{21} / \text{m}^3$

۲۰-۵-۵ به ازای هراتم آلومینیم در مثال ۵-۵-۱ چه تعداد اتم سیلیسیم وجود دارد؟

۲۱-۵-۵ نیم رسانای ذاتی ژرمانیم با ذوب کردن $3.32 \times 10^{-6} \text{ g}$ آنتیموان (Sb) با 100 g ژرمانیم تشکیل شده است. الف) نیم رسانا از نوع n است یا از نوع p ؟ ب) غلظت آنتیموان در ژرمانیم را (بر حسب $\text{cm}^3/\text{اتم}$) حساب کنید. (چگالی ژرمانیم 5.35 Mg/m^3 یا 5.35 g/cm^3 است.)

□ ۲-۶-۵ دمای Inp چقدر باید بالا رود تا مقاومت آن به نصف آنچه در 50°C بود برسد؟ شکاف انرژی آن 1.3 eV است.

□ ۳-۶-۵ ترانزیستوری در گسیلنده‌ای بین 10 میلی ولت و 100 میلی ولت کار می‌کند. در ولتاژ کمتر، جریان کلکتور 6 میلی آمپر است؛ در ولتاژ بالاتر به 600 میلی آمپر می‌رسد جریان را در هنگامی که ولتاژ گسیلنده 50 mV است تخمین بزنید.

جواب: 46 mA

□ ۴-۶-۵ با مراجعه به مثال ۲-۶-۵، اگر ولتاژ گسیلنده دو برابر شود و از $17\text{ به }34\text{ میلی ولت}$ برسد جریان کلکتور با چه ضریبی افزایش خواهد یافت؟

فلزات تك فاز

چشم انداز فصل

فلزات نسبت به دودسته اصلی دیگر موادی یعنی پلی مرها و سرامیکها، نسبتاً ساده ترند، زیرا تعداد زیادی از فلزات فقط حاوی يك نوع اتم اند (یا محلول جامدی مثل برنج اند که در آن روی به جای مس قرار می گیرد بدون آنکه تغییری در ساختار به وجود آید). بنابراین ابتدا چگونگی ارتباط بین ساختار و فلزات را بررسی می کنیم، سپس در فصل ۸ و ۷ به ترتیب به بررسی پلاستیکها و سرامیکها می پردازیم. هنگامی که تغییر شکل کشان و پلاستیکی و شکست حاصل از آن را در نظر می گیریم، باید هم به ساختار بلور و هم به میکروساختار توجه کنیم. ویژگی جدیدی ارائه خواهد شد، که عبارت است از امکان تابکادی فلز و از بین بردن عیوب ساختاری، که قبلاً به وجود آمده اند؛ این امر می تواند تأثیر مهمی روی خواص داشته باشد.

هدف از مطالعه

۱. آشناسدن با مقادیر مربوط به خواصی که معمولاً با آنها برخورد دارید، در مورد فلزات تابکاری شده، مثل مس و نیکل، و آلیاژهای تابکاری شده مثل برنج و Cu-Ni.

۲. تشریح میکروساختارهای مختلف تک فاز و درک اصول رشد دانه.

۳. گسترش معلومات شما در مورد رفتار کشسان، فراتر از آنچه در بخش ۱-۲ آمده است، که الف) سه نوع اصلی مدول (بانگ، برشی و کشیدگی) و ب) تغییر با دما، استحکام پیوند، و جهتگیری بلوری را شامل می شود.

۴. دانستن منشأ محلول سختی، کرنش سختی، تابکاری بر حسب نابجایی، و تبلور مجدد.

۵. کاربرد دانسته های شما در مورد محلول سختی، کرنش سختی و تبلور مجدد برای انتخاب مواد و فرایندهای مربوط به کسب خواص.

۶. پیش بینی رفتار فلزات در حین کارهنگامی که در دماهای بالا، در معرض بار ضربه ای، یا چرخه ای، و در محیطهای تابشی قرار می گیرند.

۱-۶ آلیاژهای تک فاز

بسیاری از مواد پرمصرف تنها یک فاز دارند. ممکن است اینها فلزات خالص تجارتي، بسا فقط یک جزء باشند. مثل مس برای سیمکشی، روی برای پوشش دادن فولاد روپینه کاری شده و آلومینیم برای ظروف خانگی. ولی در موارد متعدد دیگر، جزء دومی عمداً به فلز اضافه می شود تا خواص را بهتر کند. این نوع ترکیبات حاوی فلزات را آلیاژ می گویند.

آلیاژها اگر از حد حلالیت جامد فراتر نروند فلزات تک فازند. برنج (آلیاژ تک فاز مس و روی)، مفرغ (آلیاژی مشابه از مس و قلع)، و آلیاژهای مس و نیکل نمونه هایی از آلیاژهای تک فازند که در این فصل مطالعه خواهیم کرد. آلیاژهای چند فاز یا پلی فاز، حاوی فازهای بیشتری اند زیرا از حد حلالیت فاز گذشته اند. قسمت اعظم فولادها مثل بسیاری از فلزات دیگر، آلیاژهای چند فازند که در فصل بعد آنها را شرح خواهیم داد.

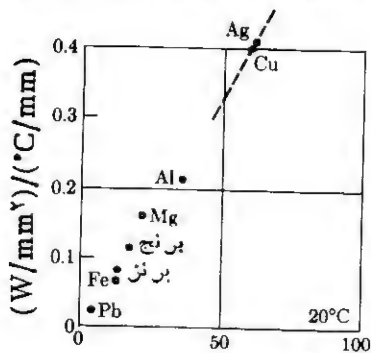
خواص آلیاژهای تک فاز. همان طور که در شکل های ۱-۶ و ۱-۷ (صفحات ۲۳۹ و ۲۴۰) برای برنج و محلول جامد Cu-Ni دیده می شود خواص آلیاژها با خواص فلزات خالص تفاوت دارد. افزایش استحکام و سختی به علت وجود اتمهای جسم حل شدنی است که در حین تغییر شکل پلاستیکی مانع حرکت نابجاییها در بلور می شود. بعداً (در بخش ۶-۴)

خواهیم دید که علت این مانع آن است که نایجابیها نمی توانند به سادگی از اتمهای آلیاژی بگذرند.

مقدار بسیار کمی از ناخالصیها، رسانندگی الکتریکی فلزات را کاهش می دهند، زیرا اتمهای خسارجی در میدان الکتریکی داخل شبکه بلور نایکخواختی به وجود می آورد. بنابراین الکتروننها انحراف و بازتاب بیشتری را همراه با کاهش بعدی در میانگین مسیر آزاد تجربه می کنند (بخش ۵-۲).

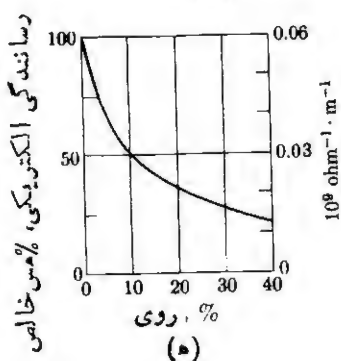
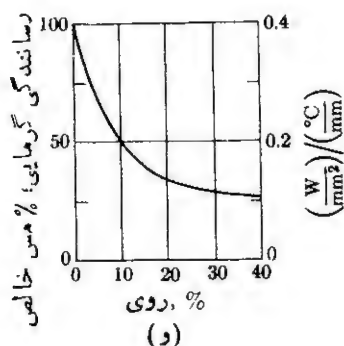
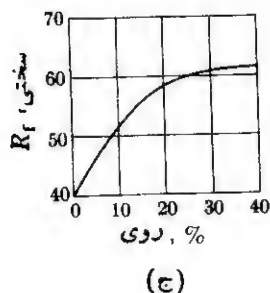
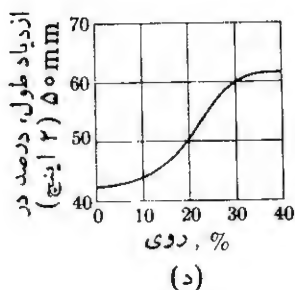
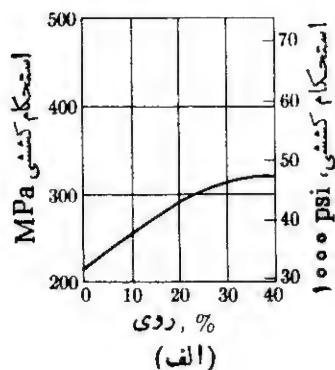
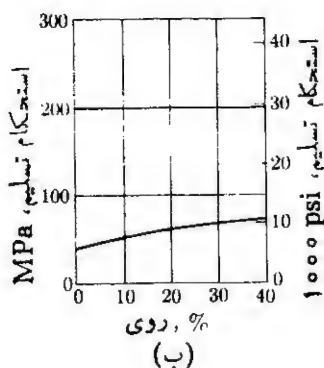
در هر فلز، الکتروننها قسمت اعظم انرژی را برای رسانش گرمایی حمل می کنند. بنابراین ارتباطی بین رسانندگی گرمایی و الکتریکی وجود دارد. [۵) و (۶) مربوط به شکلهای ۶-۱ و ۶-۳ را مقایسه کنید.] در حقیقت چندی قبل دریافتند که در بیشتر فلزات k/σ در دمای معمولی ($\sim 20^\circ\text{C}$) تقریباً $W \cdot \Omega/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$ است که در آن رسانندگی گرمایی، k ، و رسانندگی الکتریکی، σ ، به ترتیب بر حسب $(\text{W}/\text{m}^2)/(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ و $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ نوشته می شوند (شکل ۶-۱). این نسبت را نسبت ویدامان-فرانتس ($W-F$) می نامند. از آنجا که داده هایی از مقادیر مقاومت الکتریکی فلزات در دماهای مختلف به راحتی در دسترس است برای به دست آوردن مقدار رسانندگی که مشکلتر در دسترس قرار می گیرد، نسبت $W-F$ قاعده سرانگشتی مناسبی است.

میکروساختارهای آلیاژهای تلفاز. دانه ها در بخش ۴-۴ به عنوان بلورهای مستقل تعریف شدند. موادی که دانه های بسیار دارند تحت عنوان چند دانه ای یا بهتر بگوییم چند بلودین تعریف می شوند. بلورهای مجاور جهتگیری نامتشابهی دارند به طوری که مرز دانه ای وجود دارد (شکل ۴-۴-۷). میکروساختار فلزات تلفاز می تواند با اندازه، شکل، و جهتگیری دانه ها تغییر کند (شکل ۶-۱-۴). این جنبه ها کاملاً مستقل نیستند زیرا شکل و اندازه بلورها هر دو نتیجه رشد دانه است. همچنین شکل دانه معمولاً به جهتگیری بلورین دانه ها در حین رشد بستگی دارد.



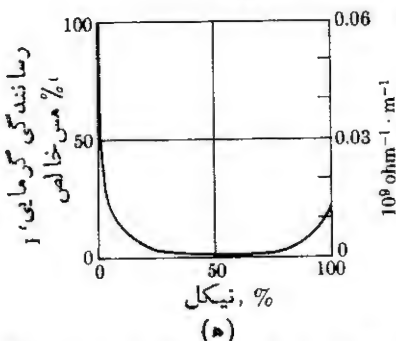
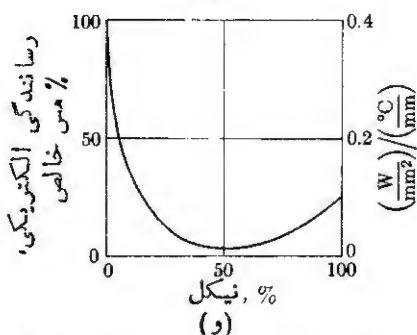
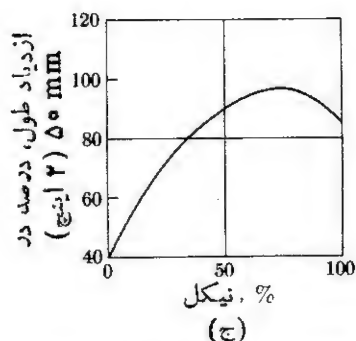
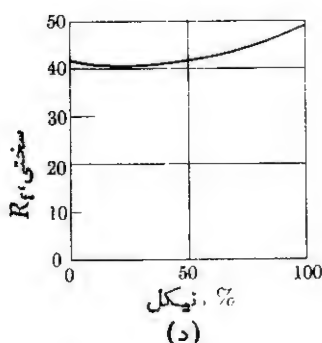
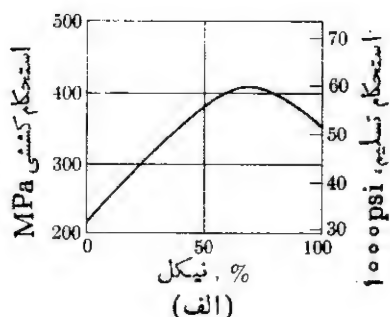
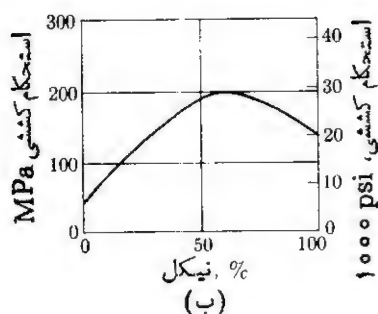
رسانندگی الکتریکی (σ),
 $10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

شکل ۶-۱-۱ رسانندگی فلزی (گرمایی در مقابل الکتریکی در 20°C). از آنجا که الکتروننها انرژی گرمایی را انتقال می دهند، یک رسانای الکتریکی خوب، از نظر گرمایی نیز رسانای خوبی است. (نسبت $W-F$ به دمای مطلق بستگی دارد. این بستگی در مورد فلزات خاص بهترین صورت را دارد. ولی شامل غیر فلزات نمی شود.)



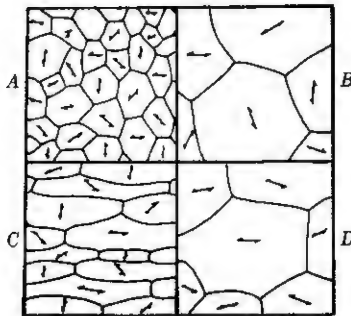
شکل ۶-۱-۲ خواص مکانیکی و فیزیکی برنجهای تابکاری شده. حد حلالیت روی در مس fcc تقریباً ۴۰٪ است.

اگر چه صحبت از اندازه دانه بر حسب قطر معمول است ولی به ندرت دانه‌ای از فلزات تک فاز یافت می‌شود که کروی باشد. در عوض دانه‌ها باید کاملاً فضا را پر کنند و نیز سطح کل مرز دانه‌ها را کمینه نگه‌دارند. این امر در شکل‌های ۴-۴، ۸-۴ و ۴-۱۰ (الف) دیده می‌شود که در آن‌ها دانه‌ها به صورت هم‌محدود توصیف شده‌اند زیرا در سه جهت مختصات ابعادی تقریباً یکسان دارند. علاوه بر دانه‌های هم‌محور، سایر اشکال دانه که معمولاً با آن‌ها



شکل ۳-۱-۶ خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای مس - نیکل تا بکاری شده. مس و نیکل مجموعه کاملی از محلولهای جامد را تشکیل می دهند.

بر خورد می کنیم، عبارت اند از صفحه ای شکل [شکل ۳-۱-۶ (ج)]، ستونی، یاساخه ای (یعنی شبیه به درخت). در این کتاب هیچ کوششی برای اسلوب دادن به آنها نخواهد شد. جهت گیری دانه ها در فلز به طور کلی کاملاً تصادفی است [شکل ۳-۱-۶ (الف)]. ولی استثنائاتی هم وجود دارد که می تواند از نظر خواص مهندسی اهمیت داشته باشد. مثلاً جهات [۱۰۰] آهن نفوذ پذیری مغناطیسی بیشتری نسبت به سایر جهات دارند. بنابراین اگر جهت گیری دانه ها، درون صفحه چند بلورین ترانسفورماتور تصادفی نباشد، طی فرایندی جهت گیری ترجیحی را به دست می آورد، به صورتی که ترجیحاً جهت [۱۰۰] با میدان



شکل ۹-۱۶ متغیرهای میکروساختار فلزات تک فاز. اندازه دانه (الف نسبت به ب). شکل دانه (الف نسبت به ج). جهتگیری ترجیحی (ب نسبت به د).

مغناطیسی در يك راستا قرار گیرد. در این صورت می توان به طور قابل توجهی کارکرد ترانسفورماتور را مؤثرتر کرد، متالورژی دانان آموخته اند که چگونه این کار را با حاصل بیلیونها دلار صرفه جویی در توزیع قدرت الکتریکی، انجام دهند.

مثال ۹-۱-۶ استحکام کششی آلیاژ مس-نیکل باید بیشتر از ۲۹۰ MPa و رسانندگی گرمایی آن باید بیشتر از $(W/mm^2)/(^{\circ}C/mm)$ ۵۵۰۰۰ باشد. آلیاژی را از شکل ۹-۱-۶ انتخاب کنید.

حل:

$$S_t, \text{ استحکام کششی } \%19 < x < \%100 \text{ Ni}$$

$$k, \text{ رسانندگی گرمایی } \%0 < x < \%25 \text{ Ni}$$

و

$$\%85 < x < \%100 \text{ Ni}$$

$$\%19 - \%25 \text{ Ni} \quad \text{گستره مشخصات}$$

و

$$\%85 - \%100 \text{ Ni}$$

۸۰ Cu-۲۰ Ni را انتخاب کنید، زیرا نیکل از مس گرانتز است.

توضیح. اگر کسی سکه هایی را از جیب خود برداشته آزمایش کند در می یابد که نیکل بسیار گرانتز از مس است.

ویژگیهای آن به ندرت در حد بالایی گستره قرار می گیرد.

مثال ۹-۱-۶ آهن را به عنوان رسانای گرمایی در $300^{\circ}C$ به کار می بریم. رسانندگی آن، در پوست ج، برای $20^{\circ}C$ آمده است. اگر k/σ متناسب با K باشد مقدار k_{3000C} را تخمین بزنید.

حل: از جدول ۱-۲-۵ و معادله (۱-۲-۵)

$$\sigma_{300^\circ\text{C}} = \frac{1}{\rho_{300^\circ\text{C}}} = \frac{1}{[90 \times 10^{-9} \text{ ohm.m}][1 + (0.00045/^\circ\text{C})(300^\circ\text{C})]}$$

$$= 4.7 \times 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

از آنجا که نسبت W-F در 20°C تقریباً $7 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \Omega/^\circ\text{C}$ است

$$W-F_{300^\circ\text{C}} = (\sim 7 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \Omega/^\circ\text{C})(573 \text{ K}/293 \text{ K})$$

$$= \sim 1.37 \times 10^{-6} \text{ W} \Omega/^\circ\text{C}$$

$$k_{300^\circ\text{C}} \sim \sigma (W-F_{300^\circ\text{C}}) =$$

$$\frac{(4.7 \times 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})(\sim 1.37 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \Omega/^\circ\text{C})}{10^{-3} \text{ mm/m}}$$

$$= \frac{\sim 6.44 (\text{W/mm}^2)}{^\circ\text{C/mm}}$$

توضیح. مقدار تجربی به دست آمده که در کتاب مرجع فلزات گزارش شده در 300°C برابر با $(6.44 \text{ W/mm}^2)/(^\circ\text{C/mm})$ است. نسبت W-F برای مواد غیر فلزی که الکترون برای انتقال انرژی گرمایی در دسترس ندارند، به کار نمی رود. ▲

مثال ۳-۱-۶ اگر به میله ای بار 250 kg وارد آید، باید مقاومتی کمتر از $1 \Omega/\text{m}$ و کرنش کششی کمتر از 1 mm/m داشته باشد؛ و نباید به طور پلاستیکی تغییر شکل دهد. کمینه قطر لازم برای میله ای از جنس فلز مونیل ($70\text{Ni}-30\text{Cu}$) چقدر است؟ اگر میله از برنج ($70\text{Cu}-30\text{Zn}$) باشد چطور؟

حل: داده های پیوست ج و شکل های ۳-۱-۶ و ۲-۱-۶

	70 Ni-30 Cu	70 Cu-30 Zn
S_y , MPa	195	70
ρ , $\Omega \cdot \text{m}$	480×10^{-9}	62×10^{-9}
E , MPa	180000	110000

برای $1 \Omega/\text{m}$ و با جابه جایی رابطه (۳-۴-۱)

$$d = \sqrt{(4\rho L)/(\pi \sigma)} \quad 2.5 \text{ mm} \quad 0.89 \text{ mm}$$

برای m/m و ۰.۰۰۰۱ و $F = (۲۵۰ \times ۹.۸ \text{ N})$

$$d = \sqrt[3]{(۴F)/\pi E(۰.۰۰۰۱)} \quad \text{برنج (۵۰۳ mm)} \quad \text{(مونل) (۴۰۲ mm)}$$

برای آنکه تغییر شکل پلاستیکی به وجود نیاید و با $F = (۲۵۰ \times ۹.۸ \text{ N})$

$$d = \sqrt[3]{۴F/\pi S_y} \quad \text{برنج (۶۰۷ mm)} \quad \text{(مونل) (۴۰۰ mm)}$$

توضیح. کمینه قطر با حروف سیاه نشان داده شده است. ارقام کوچکتر از آن هر سه شرط را برآورده نمی کنند.

۲-۶-۱ انجام فرایند روی آلیاژهای تک فاز

انجام فرایند بر روی بیشتر فلزات از طریق ذوب کردن است. در حالت مذاب ناخالصیهایی ناخواسته جدا و فلز از نظر شیمیایی تصفیه خواهد شد. اگر قرار باشد آلیاژهایی مثل برنج یا منبرغ تولید شوند به ترتیب روی یا قلع به مس مذاب افزوده می شود. در حالت مذاب روی (یا قلع) به سادگی حل شده و به طور یکتواخت در فلز مذاب پراکنده می شود.

سیم، فلز در قالبی ریخته می شود تا منجمد شود. قالب ممکن است به شکل محصول نهایی باشد، مثل زنگ مرغی بزرگ، یا ممکن است قطعه ریختگی منجمد شده برای شکستگیری نهایی به ماشینکاری نیاز داشته باشد (شکل ۶-۲-۱). در حالات دیگر قالب به صورت شمش است که شمش بلوک منجمد شده ای از فلز (یا از سایر مواد) است که بعداً به صورت کار مکانیکی یا شکل دادن تغییر شکل پیدا کرده و به میل، سیم، لوله، ورق، قطعه

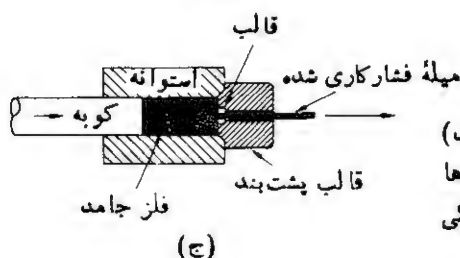
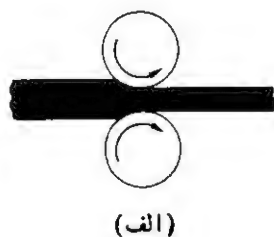
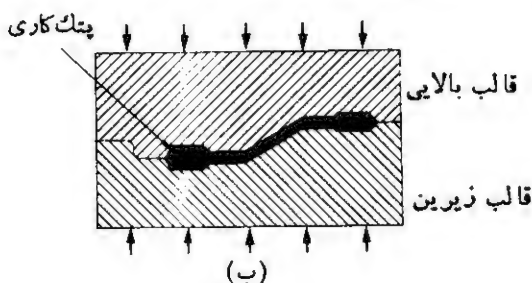


شکل ۶-۲-۱ قطعه ریختگی (قسمت بریده شده ای از شیر برنجی) یا انجماد فلز مذاب در قالب ماسه ای، شکلی به دست آمده است که فقط به ماشینکاری اندکی نیاز دارد.

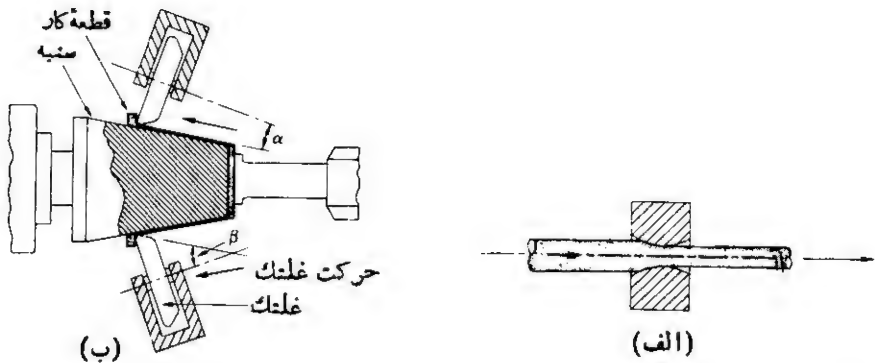
پتک‌کاری شده و غیره تبدیل می‌شود. در حین انجام فرایند مکانیکی، شکل تغییر می‌کند؛ بنابراین باید تنش‌هایی به کار رود که از استحکام تسلیم، که در فصل ۱ شرح داده شد، بیشتر باشد. در نتیجه، انجام فرایند روی شمش یزرگ اولیه معمولاً در دماهای بالا صورت می‌گیرد زیرا در این حالت ماده به طور کلی نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر است، در آن دماها انرژی کمتری برای تغییر شکل لازم است و در حین انجام فرایند احتمال شکستن کمتر است. نمود، پتک‌کاری، و فشارکاری (شکل ۲-۶-۲) از انواع متداول فرایندهای تغییر شکل گرم‌اند.

به دنبال مراحل تغییر شکل اولیه، اغلب ادامه فرایند در دماهای متعارفی مطلوب‌تر است و این امر امکان‌پذیر است زیرا اکنون ابعاد آن کوچکتر و نیروها و انرژی لازم به همان نسبت کمتر است. همچنین در هزینه‌های کوره و سوخت صرفه‌جویی می‌شود. علاوه بر این بیشتر فلزات در دمای بالا سریعاً اکسید می‌شوند. در دماهای پایین کلاً از این امر اجتناب می‌شود. بالاخره در این فصل خواهیم دید که اگر تغییر شکل در حالتی که فلز در دمای معمولی است انجام شود، استحکام معمولاً افزایش می‌یابد. کشش سیم، دق‌کاری چرخشی (شکل ۲-۶-۳) و منگنه‌کاری نمونه‌هایی از فرایندهای تغییر شکل ثانویه معمول‌اند که در دمای متعارفی انجام می‌شوند.

به منظور درک رفتار فلزات در مراحل انجام فرایند یا بعدها در حین کار، لازم است معلومات خود را در مورد تغییر شکل کشسان از آنچه که در فصل ۱ آمده است کامل‌تر کنیم و مکانیسم تغییر شکل پلاستیکی را در نظر بگیریم. بالاخره لازم است اثرات دمای بالا را روی مواد نشان دهیم زیرا فلز ممکن است در حین انجام فرایند در دمای بالا و یا در حین کار، ساختار (و بنابراین خواص) خود را تغییر دهد. این موضوعات به ترتیب خواهد آمد.



شکل ۲-۶-۲ کار مکانیکی (اولیه). (الف)
نورد (ب) پتک‌کاری (ج) فشارکاری. این فرایندها در دمای بالا می‌تواند تغییر شکل پلاستیکی شدیدی ایجاد کنند.

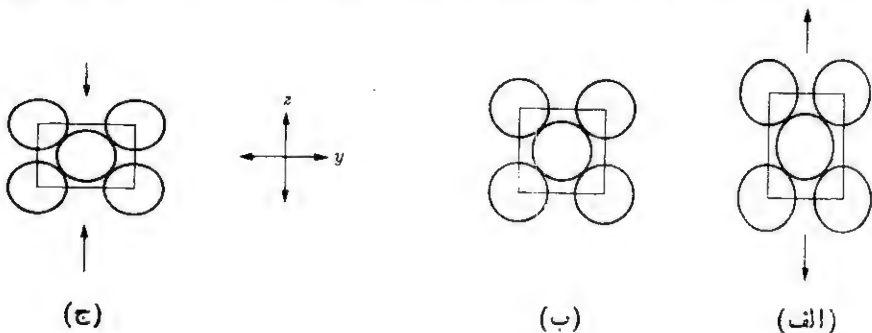


شکل ۳-۲-۶ کار مکانیکی (ثانویه). الف) کشش سیم؛ ب) ورقکاری چرخشی. بیشتر فلزات وقتی در دمای متعارفی تغییر شکل می‌یابند محکم‌تر می‌شوند. بنابراین، این فرایندها در مقایسه با فرایندهای اولیه شکل ۳-۲-۶، به محصولات با سطح مقطع کوچکتر اختصاص دارند.

۳-۶ تغییر شکل کشسان

تغییر شکل کشسان وقتی صورت می‌گیرد که تنش روی قطعه فلز، یا بدین منظور روی هر ماده جامد دیگر اعمال شود (بخش ۱-۲). وقتی بار به صورت کششی به کار می‌رود قطعه اندکی طول‌تر می‌شود؛ برداشتن بار به نمونه اجازه می‌دهد که به ابعاد اولیه برگردد. برعکس وقتی بار به صورت فشاری اعمال می‌شود، قطعه اندکی کوتاه‌تر می‌شود. کرنش کشسان نتیجه ازدیاد طول اندک سلول واحد در جهت بار کششی، یا انقباض اندک سلول واحد در جهت بار فشاری (شکل ۳-۶-۱) است.

وقتی فقط تغییر شکل کشسان صورت می‌گیرد، کرنش اساساً با تنش متناسب است این نسبت بین تنش و کرنش مدول کشسانی (مدول یانگ) است و از ویژگی‌های نوع فلز



شکل ۳-۶-۱ کرنش قائم کشسان (خیلی اغراق آمیز). آنها از همسایه‌های اولیه خود به‌طور دائم جدا نمی‌شوند. الف) کشش؛ ب) بدون کرنش؛ ج) فشار.

به شمار می رود. هرچقدر نیروهای جاذبه بین اتمها در فلز بیشتر شود، مدول کشسانی بیشتر خواهد شد.

هر نوع افزایش طول یا فشردگی ساختار بلوری در جهت واحد و در اثر نیروی تك محوری، موجب تنظیم شدن ابعاد در زاویه عمود بر نیرو می شود. مثلا در شكل ۱-۳-۶ (الف)، انقباض كوچكى در جهت عمود بر نیروی كشی به وجود می آید. نسبت منفی بین کرنش طولی e_y و کرنش كشی مستقیم e_z نسبت پواسون ν نامیده می شود

$$\nu = -\frac{e_y}{e_z} \quad (۱-۳-۶)$$

سواد مهندسی را می توان همانند كکش (و فشار) تحت بار برشی قرارداد. در بار گذاری برشی، دو نیرو موازی اند ولی در يك راستا نیستند [شكل ۲-۳-۶ (ب)]. در نتیجه، تنش برشی، τ ، برابر است با F_s تقسیم بر سطح تحت یرش قرار گرفته A_s

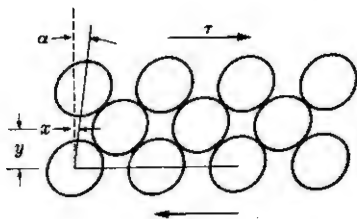
$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (۲-۳-۶)$$

تنش برشی تغییر مکان زاویه ای، α ، را به وجود می آورد. کرنش برشی، γ ، به صورت تانژانت آن زاویه، یعنی x/y در شكل ۲-۳-۶ (ب) تعریف می شود. کرنش قابل بازیابی یا کرنش برشی كشان با تنش برشی متناسب است

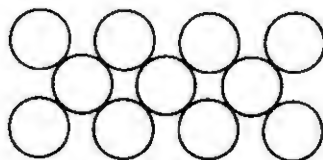
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (۳-۳-۶)$$

که در آن G مدول برشی است. مدول برشی که مدول صلابت نیز نامیده می شود با مدول کشسانی E تفاوت دارد؛ ولی در تنشهای کم توسط رابطه ای این دو به هم مربوط می شوند که به صورت زیر نوشته می شود

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (۴-۳-۶)$$



(ب)



(الف)

شكل ۲-۳-۶ کرنش برشی كشان. جفت های برشی، در يك صفحه اتم نسبت به صفحه بعدی جابه جایی نسبی ایجاد می کنند. این کرنش تا وقتی که اتمها، همسایه های اولیه خود را حفظ می کنند كشان است. (الف) بدون کرنش؛ (ب) کرنش برشی.

از آنجا که نسبت بواسون ν معمولاً بین ۰.۲۵ و ۰.۵۰ است، مقدار G تقریباً ۳۵٪ از E است.

مدول کشسانی سوم، مدول کشیدگی، K است که عکس فشار پذیری، β ، ماده و مساوی با فشار هیدروستاتیکی P_h بر واحد فشار حجمی، $\Delta V/V$ است

$$K := \frac{P_h V}{\Delta V} = \frac{1}{\beta} \quad (۵-۳-۶)$$

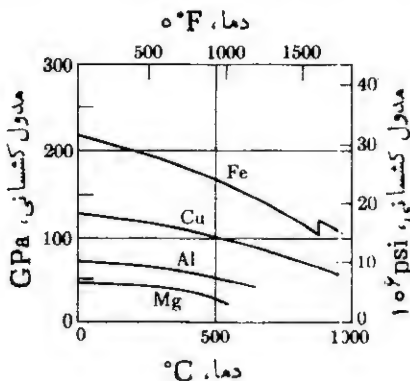
مدول کشیدگی به صورت زیر به مدول کشسانی مربوط می شود

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (۶-۳-۶)$$

به دست آوردن این رابطه در مسئله ۶-۳-۶ مطرح شده است.

مدول کشسانی بر حسب دما. همان طور که در شکل ۳-۳-۶ برای چهار فلز معمولی دیده می شود، مدول کشسانی با افزایش دما کاهش می یابد. طبق شکل ۲-۵-۲ (الف)، انبساط گرمایی مقدار dF/da و بنابراین مدول کشسانی را کاهش می دهد. ناپیوستگی در منحنی آهن در شکل ۳-۳-۶ به علت تغییر از bcc به fcc در دمای 912°C (1674°F) است. جای تعجب ندارد اگر بگوییم چند شکلی fcc کوه فشرده تر است، برای کرنش معین به تنشهای بیشتری نیاز دارد. یعنی مدول کشسانی برای fcc بیشتر می شود. همچنین از شکل ۳-۳-۶ باید دریافت که فلزات با نقطه ذوب بالا دارای مدول کشسانی بزرگترند.

مدول کشسانی بر حسب جهت بلور. مدول کشسانی در داخل ماده ناهمسانگرد است؛ یعنی با جهت بلوری تغییر می کند. مثلاً آهن مدول کشسانی متوسطی معادل تقریباً ۲۰۵ GPa دارد؛ ولی مدول واقعی بلور آهن از ۲۸۰ GPa در جهت [۱۱۱] تا فقط

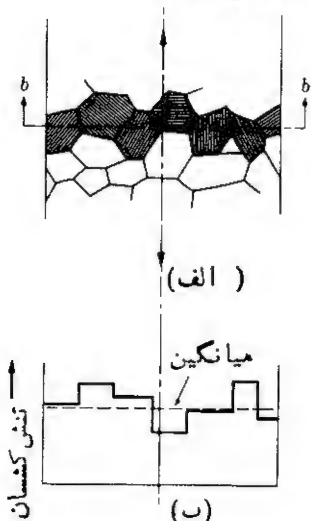


شکل ۳-۳-۶ مدول کشسانی بر حسب دما.

جدول ۱-۳-۶ مدول کشسانی (مدول یانگ)

فلز	بیشینه GPa	کمینه GPa	تصادفی GPa
آلومینیم	۷۵	۶۰	۷۰
طلا	۱۱۰	۴۰	۸۰
مس	۱۹۵	۷۰	۱۱۰
آهن (bcc)	۲۸۰	۱۲۵	۲۰۵
تنگستن	۳۴۵	۳۴۵	۳۴۵

۱۲۵ GPa در جهت [۱۰۰] تغییر می کند (جدول ۱-۳-۶). نتایج این ناهمسانگردی در مواد چند بلوری اهمیت بسیار دارد. فرض کنیم مثلاً شکل ۴-۳-۶ (الف) سطح مقطع سیمی فولادی را نشان دهد که در آن میانگین تنش ۲۰۵ MPa است. اگر دانه ها به طور تصادفی جهتگیری کنند، کرنش کشان ۵۰۰٪ است، زیرا میانگین مدول کشسانی ۲۰۵ GPa است. ولی در حقیقت همان طور که در شکل ۴-۳-۶ (ب) دیده می شود، تنش از ۱۲۵ MPa تا ۲۸۰ MPa تغییر می کند، زیرا دانه ها جهتگیری مختلفی دارند، ولی هر کدام کرنشی مساوی هم (۵۰۰٪) دارند. البته این به معنی آن است که بعضی دانه ها قبل از آنکه سایر دانه ها به استحکام تسلیم خود برسند، از استحکام تسلیم خود می گذرند.



شکل ۴-۳-۶ ناهمگنی تنش (طرحواره). تنشهای کشان با جهتگیری دانه ها تغییر می کنند، زیرا مدول کشسانی آنها همسانگرد نیست.

مثال ۶-۳-۱ روی ورق فولادی مربعی به ابعاد $10000 \text{ cm} \times 10000 \text{ cm}$ کشیده شده است که در یک جهت (عمود بر اضلاع مقابل مربع) با تنش 200 MPa بارگذاری می‌شود. الف) ابعاد مربع کشیده شده چقدر می‌شود؟ (نسبت پواسون فولاد $= 0.29$) بدون برداشتن تنش اولیه، تنش کششی ثانویه 410 MPa با زاویه‌ای عمود بر اولی، یعنی عمود بر اضلاع مربع اعمال می‌شود. ب) ابعاد جدید مربع کشیده شده چقدر است؟ حل: از آنجا که هیچ نوع جهتگیری ترجیحی نشان داده نشده است، مقدار مدول یانگ را برای دانه‌های تصادفی در نظر می‌گیریم (جدول ۶-۳-۱).

$$\text{الف)} \quad e_z = \frac{200 \text{ MPa}}{205000 \text{ MPa}} = 0.000975 \quad \text{از رابطه (۱-۲-۱)}$$

$$\text{ب)} \quad e_y = -0.29(0.000975) = -0.00028 \quad \text{از رابطه (۱-۳-۶)}$$

$$1000 \text{ mm}(1 + 0.000975) \times 1000 \text{ mm}(1 - 0.00028) \\ = 10010 \text{ mm} \times 9997 \text{ mm}$$

$$\text{ب)} \quad e_y = -0.00028 + \frac{410 \text{ MPa}}{205000 \text{ MPa}} = 0.00172$$

$$e_z = 0.000975 - 0.29\left(\frac{410}{205000}\right) = 0.00040$$

$$1000 \text{ mm}(1 + 0.0004) \times 1000 \text{ mm}(1 + 0.00172) \\ = 10004 \text{ mm} \times 10017 \text{ mm}$$

توضیح. از روابط (۱-۲-۱) و (۱-۳-۶) می‌توانیم رابطه‌ای کلی برای تغییر شکل کشسان در سه بعد به دست آوریم

$$\Delta \quad e_x = \frac{S_x}{E} - \frac{\nu S_y}{E} - \frac{\nu S_z}{E} \quad (7-3-6)$$

مثال ۶-۳-۲ اگر آهن با 1400 MPa تحت فشار هیدروستاتیکی قرار گیرد، درصد تغییر حجم آن چقدر است؟ (نسبت پواسون $= 0.29$)

حل: از رابطه (۶-۳-۶) و با در نظر گرفتن $E_{Fe} = 205000 \text{ MPa}$

$$K = \frac{(205000 \text{ MPa})}{3(1 - 0.29)} \\ = 162700 \text{ MPa}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = - \frac{1400 \text{ MPa}}{162700 \text{ MPa}} = -0.086 \text{ v/o}$$

داخل دیگر. از آنجا که $s_x = s_y = s_z = P_h$ ، رابطه (۶-۳-۷) به صورت زیر درمی آید

$$e_x = \frac{(1 - \nu)(-1400 \text{ MPa})}{205000 \text{ MPa}}$$

$$= -0.00287 = e_y = e_z$$

$$1 + \frac{\Delta V}{V} = (1 + e)^3$$

$$\frac{\Delta V}{V} = -0.086 \text{ v/o}$$

توضیح. رابطه (۶-۳-۷) با استفاده از حالت ویژه معادله (۶-۳-۷) که در آن $s_x = s_y = s_z = P_h$ است، به سادگی به دست می آید. ▲

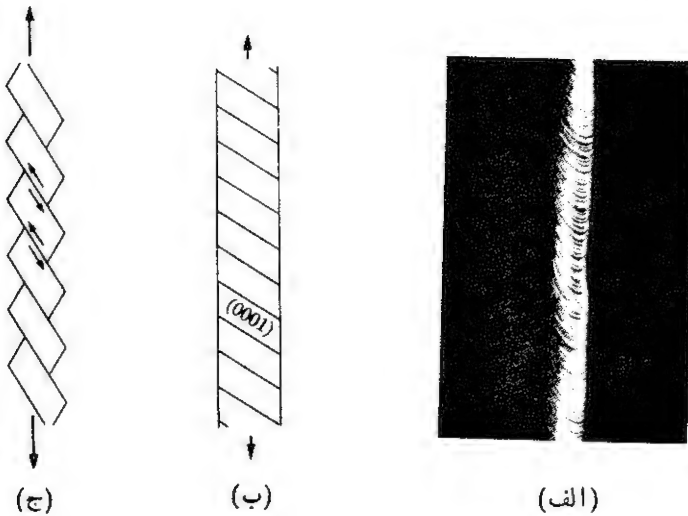
۶-۴ تغییر شکل پلاستیکی در داخل تک بلورها

فلزات مکعبی و آلیاژهای نامنظم آنها بیشتر توسط پوش پلاستیکی یا لغزش تغییر شکل می یابند که در آنها صفحه ای از اتمها روی صفحه مجاور بعدی می لغزد. این یکی از روشهای تغییر شکل فلزاتی با ساختار منشور شش بر نیز هست. حتی وقتی که تنشهای فشاری یا کششی اعمال می شوند، تغییر شکل برشی وجود دارد، زیرا این تنشها را می توان به صورت تنشهای برشی تفکیک کرد.

تنش برشی بحرانی و سیستمهای لغزش. لغزش در جهات بلوری معینی ساده تر از جهات دیگر صورت می گیرد. این امر در شکل ۶-۴-۱ دیده می شود، که در آن تک بلور فلز hcp به طور پلاستیکی تغییر شکل می یابد. تنش برشی لازم برای ایجاد لغزش در صفحه بلوری تنش برشی بحرانی τ_c نامیده می شود.

می توانیم مجموعه سیستمهای لغزش غالب در چند فلز آشنا را در جدول ۶-۴-۱ خلاصه کنیم. سیستم لغزش شامل صفحه لغزش $(hkl)^\circ$ ، و جهت لغزش $[uvw]$ است. به علت وجود صفحه های چندتایی در مجموعه صفحه ها، و جهت های چندتایی در مجموعه جهت ها، سیستمهای لغزش مختلفی وجود دارند (بخشهای ۶-۳ و ۷-۳)، در جدول ۶-۴-۱ این دو امر مشخص است:

* در بخش ۷-۳، شاخص $(hkil)$ بلورهای منشوری شش بر را ببینید.



شکل ۶-۴-۱ لغزش در تک بلور (hcp). لغزش به موازات صفحه $\{0001\}^*$ که کوچکترین بردار لغزش را دارد.

جدول ۶-۴-۱ سیستمهای لغزش غالب در فلزات

تعداد سیستمهای لغزش مستقل	جهات لغزش	صفحات لغزش	مثال	ساختار
۱۲	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$\{101\}$	$\alpha\text{-Fe, Mo, Na, W}$	bcc
۱۲	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$\{211\}$	$\alpha\text{-Fe, Mo, Na, W}$	bcc
۱۲	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$	Ag, Al, Cu, $\gamma\text{-Fe, Ni, Pb}$	fcc
۳	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{0001\}^*$	Cd, Mg, $\alpha\text{-Ti, Zn}$	hcp
۳	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{10\bar{1}0\}^*$	$\alpha\text{-Ti}$	hcp

۱. جهت لغزش در هر بلور فلزی جهتی است با بیشترین چگالی خطی در نقاط معادل، یا کوتاهترین فاصله بین نقاط معادل.

۲. صفحه‌های لغزش صفحه‌هایی اند که فضای بین آنها وسیع است (بخش ۳-۸) و بنابراین چگالی صفحه‌ای آن بالاست (بخش ۳-۷).

* در بخش ۳-۷، شاخص ($hkil$) بلورهای منشوری شش بر را پیدا کنید.

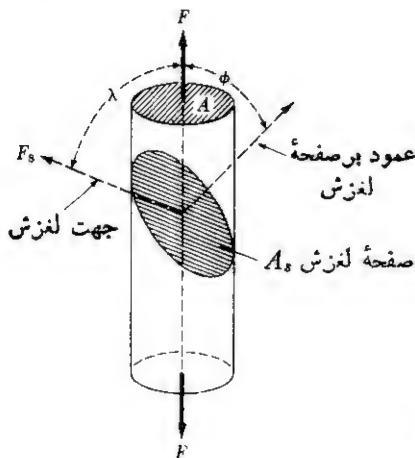
تنشهای برشی تفکیک شده. تنش محوری (کششی یا فشاری) که برای ایجاد تغییر شکل پلاستیکی لازم است، نه تنها برای سیستم لغزش هر ماده به تنش برشی بحرانی بستگی دارد بلکه به جهتگیری تنش به کار رفته نسبت به سیستم لغزش نیز مربوط می شود (شکل ۲-۴-۶). در درجه اول، سطح برشی A_s ، برابر سطح مقطع، A ، عمود بر نیروهای کششی یا فشاری نخواهد شد. در درجه دوم نیروها باید از نیروی F در جهت محوری به نیروی F_s در جهت برشی تفکیک شود. با چرخش صفحه و دور شدن آن از محور تنش اعمال شده، سطح افزایش می یابد؛ بنا بر این $A_s = A / \cos \phi$ ، که در آن ϕ زاویه بین جهت محوری و عمود بر صفحه لغزش (شکل ۲-۴-۶) است. نیروی تفکیک شده برابر است با $F_s = F \cos \lambda$ ، که در آن λ زاویه بین جهت های دنیروست. از آنجا که تنش برشی، τ ، با نیروی برشی، F_s ، بر واحد سطح برش، A_s ، برابر است

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F \cos \lambda)}{(A \cos \phi)} = s \cos \lambda \cos \phi \quad (۱-۴-۶)$$

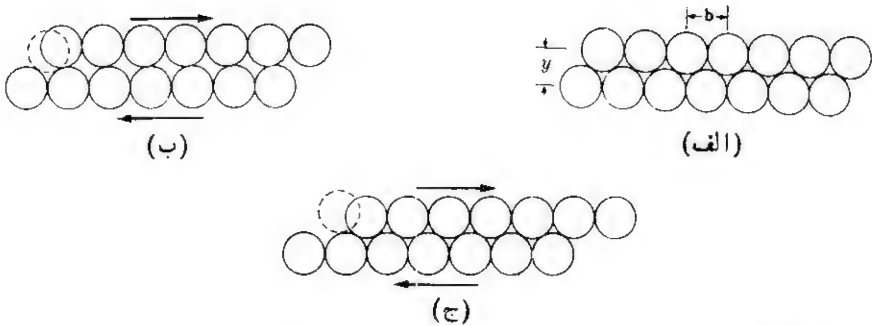
این قانون اشمید است که تنش برشی تفکیک شده، τ ، را به تنش محوری، s ، ($F/A =$) مربوط می کند.

وقتی λ و ϕ هر دو ۴۵° باشند، لغزش با کمینه نیروی محوری صورت می گیرد. تحت این شرایط τ برابر است با یک دوم تنش محوری F/A . تنش برشی تفکیک شده در هر نوع جهتگیری بلوری دیگر از تنش محوری کمتر است. این تنش با نزدیک شدن λ یا ϕ به ۹۰° ، به صفر نزدیک می شود.

مکانیسم لغزش. شکل ۳-۴-۶ مکانیسم ساده لغزش را نشان می دهد. اگر بخواهیم استحکام فلزات را بر این اساس محاسبه کنیم، نتیجه نشان خواهد داد که استحکام فلزات باید تقریباً



شکل ۲-۴-۶ تنشهای تفکیک شده. تنش محوری σ برابر است با F/A . تنش برشی تفکیک شده τ برابر است با F_s/A_s که در آن $A_s = A / \cos \phi$ و $F_s = F \cos \phi$ که از آن رابطه (۱-۴-۶) بدست می آید.

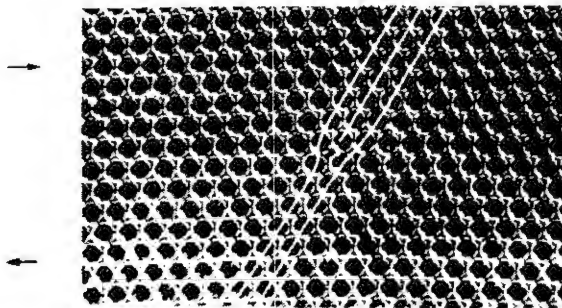


شکل ۴-۴-۶ مکانیسم فرضی لغزش (ساده شده)، در واقع فلزات با تنش برشی کمتر آنچه که این مکانیسم نیاز دارد، تغییر شکل می‌یابند.

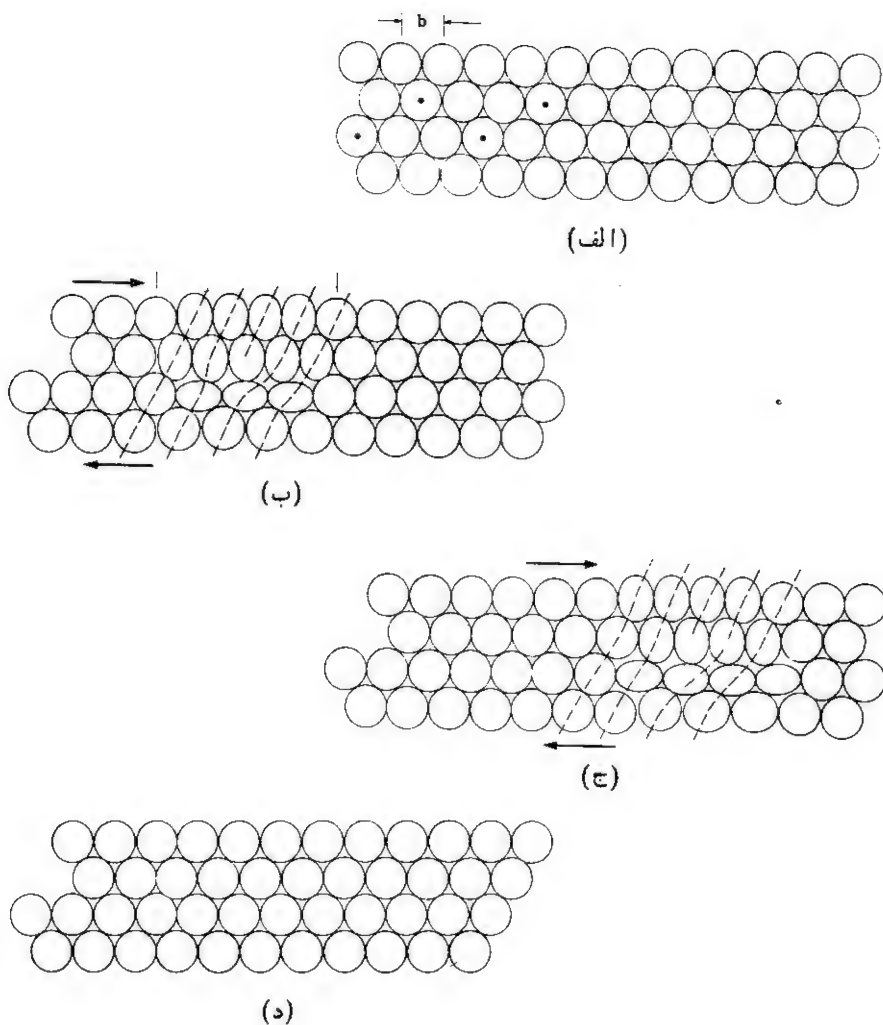
$G/6$ باشد که در آن G مدول برشی است. از آنجا که فلزات تا این حد محکم نیستند، مکانیسم لغزش متفاوتی باید عملی شود. تمام نتایج تجربی بر مکانیسمی دلالت دارند که در آن حرکت‌های نابجاییها مؤثرند. اگر از شکل ۴-۴-۶ به عنوان الگوی نابجایی استفاده کنیم و تنش برشی را در راستای افقی قرار دهیم، نابجایی (شکل ۴-۴-۵) می‌تواند با تغییر مکان برشی در داخل بلور حرکت کنند. (شکل ۴-۴-۵ را نیز ببینید.) تنش برشی لازم برای این نوع تغییر شکل، کسر کوچکی از مقدار قبلی $G/6$ است و با استحکام برشی مشاهده شده جور است.

□ مکانیسم لغزش مستلزم رشد و حرکت خط نابجایی است. انرژی، E ، خط نابجایی با طول خط نابجایی، l ، حاصل ضرب مدول برشی، G ، و مربع بردار واحد لغزش، b ، متناسب است (بخش ۴-۴)

$$E \propto lGb^2 \quad (۴-۴-۶)$$



شکل ۴-۴-۶ نابجایی لبه‌ای. الکوئی از عیب ساختار بلوری به شکل حبابهای ردیف شده. به ردیف اضافی آنها دقت کنید.



شکل ۵-۴-۶ لغزش توسط نابجایی. در این الگو فقط تعداد کمی از اتم‌ها در یک زمان از موقعیت کم انرژی خود حرکت می‌کنند. بنابراین در مقایسه با وقتی که اتم‌ها با هم به شکلی که در شکل ۳-۴-۶ پیشنهاد شده حرکت می‌کنند، برای ایجاد لغزش تنش کمتری نیاز است.

این خود به خود به معنی آن است که ساده‌ترین نابجایی‌ها برای ایجاد و گسترش تغییر شکل پلاستیکی، آنهایی‌اند که کوتاه‌ترین بردار واحد لغزش، b ، را دارند. (شکل ۳-۴-۲)، به ویژه از آن جهت که b به صورت مربع است. جهت‌های لغزش در فلزی با کوتاه‌ترین بردار لغزش، جهت‌هایی‌اند که چگالی خطی اتم‌ها در آنها بیش‌تر از همه است. کمترین مقدار مدول برشی، G ، به صفحه‌هایی که بیش‌ترین فاصله را دارند مربوط است و بنابراین چگالی صفحه‌ای

اتمهای آنها از همه بیشتر است. از این رو می توان این قاعده سرانگشتی را مطرح کرد که در آن کمترین تنشهای برشی بحرانی دوی صفحه هایی با بیشترین چگالی و درجهتهایی با بیشترین چگالی پیش بینی می شود.*

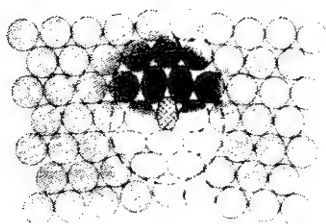
حرکتهای نابجایی در محلول جامد. نابجایی لبه ای چه به صورت (ب) و چه به صورت (ج) در شکل ۴-۵ باشد، انرژی مربوط به آن (شکل ۴-۳-۴) یکسان است. بنابراین برای حرکت بین این دو حالت به انرژی نیازی نیست.** ولی وقتی اتمهای جسم حل شدنی وجود داشته باشند چنین نیست. مطابق شکل ۴-۵-۶، زمانی که اتم ناخالصی وجود داشته باشد، انرژی مربوط به نابجایی کمتر از انرژی در فلز خالص است. بنابراین وقتی نابجایی به اتمهای خارجی برخورد می کند، از حرکت آن جلوگیری می شود زیرا برای خلاصی آن و لغزش بیشتر، باید انرژی صرف شود. در نتیجه فلزاتی که به صورت محلول جامدند معمولاً نسبت به فلزات خالص استحکام بیشتری دارند (شکلهای ۶-۱-۲ و ۶-۱-۳). این عمل را سخت کردن محلولی می نامند.

□ ترکیبات بین فلزی. فازهایی مثل Al_5Mg_3 ، Cu_2Al ، $CuAl_2$ و β' (CuZn) در قسمتهای مختلف این متن ذکر می شوند. این فازها در مقابل برش مقاوم اند؛ همان طور که در مورد سرامیکها (فصل ۸) یا در مورد هر ترکیب سه بعدی که حاوی همسایگانی از اتمهای غیر مشابه است چنین است، زیرا لغزش، نظم ترجیحی بین اتمهای غیر مشابه را بهم می زند (شکل ۴-۲-۲). بنابراین اینها سخت و انعطاف ناپذیر و در نتیجه تردند. این فازهای سخت خود به سادگی قابل استفاده نیستند؛ ولی وقتی به صورت ذرات خیلی ریز در آلیاژهای نرم موجود باشند به فلزات استحکام می دهند (فصل ۱۱).

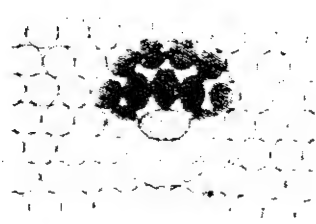
مثال ۴-۶-۱ برای داشتن نیروی تفکیک شده 130 N در جهت $[100]$ بلور مکعبی، چه نیرویی در جهت $[1\bar{1}0]$ لازم است؟

$$\text{حل:} \quad \frac{F_{(100)}}{F_{(1\bar{1}0)}} = \cos[1\bar{1}0] \times [100]$$

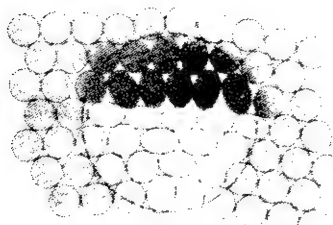
* کلا استثنای آشکاری در این قاعده وجود دارد زیرا صفحه ها و یا جهتهای لغزش آسان برای دریافت تنش برشی تفکیک شده، جهتگیری کرده اند. مثلاً اگر نیروی در جهت $[011]$ یک فلز bcc اعمال شود در $[1\bar{1}1][0\bar{1}1]$ نمی تواند لغزشی صورت گیرد، زیرا $\cos \phi = 0$ است. ولی، احتمال لغزش در سیستم $[1\bar{1}1][211]$ وجود دارد زیرا $\cos \phi$ و $\cos \lambda$ به ترتیب برابرند یا $1/\sqrt{3}$ و $1/\sqrt{3}$ و بنابراین $\tau = 0.47 (F/A)$.
** این در دو حالت صحیح نیست. (۱) در صورتی که حرکت منجر به افزایش طول نابجایی شود، یا (۲) تجمع نابجایی وجود داشته باشد (شکل ۶-۷-۶).



(ب) اتم ناخالصی کوچکتر



(الف) اتم ناخالصی بزرگتر



(ج) فلز خالص

شکل ۶-۴-۶ محلول جامد و نابجاییها. اتمی با اندازه ناهماتک، تنش اطراف نابجایی را کاهش می دهد. در نتیجه برای جدا کردن نابجایی از اتم جسم حل شده، باید انرژی صرف شود و تنش اضافی اعمال شود و این عامل اصلی سخت کردن محلولی است.

$$F_{(1\bar{1}0)} = \frac{130 \text{ N}}{\cos 45^\circ}$$

$$= 182 \text{ N}$$

مثال ۶-۴-۶ تنش برشی بحرانی τ_c برای سیستم لغزش $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ مس خالص ۱ MPa است. (الف) چه تنشی در جهت $[001]$ باید اعمال شود تا در جهت $[101]$ و روی صفحه $(\bar{1}11)$ لغزش ایجاد کند؟ (ب) در جهت $[110]$ و روی صفحه (111) چطور؟

حل: از شکل ۳-۷-۳ (ج)

$$\cos \phi = \frac{\text{ضلع سلول واحد}}{\text{قطر سلول واحد}} = \frac{a}{a\sqrt{3}} = 0.577 \quad (\text{الف})$$

$$\cos \lambda = \frac{\text{ضلع سلول واحد}}{\text{قطر وجه سلول واحد}} = \frac{a}{a\sqrt{2}} = 0.707$$

$$s = \frac{F}{A} = \frac{1 \text{ MPa}}{(0.577)(0.707)} = 2.45 \text{ MPa}$$

(ب) از آنجا که $\lambda = 90^\circ$ است، بنابراین $\cos \lambda = 0$ و $s = \infty$ (وقتی تنش در جهت $[001]$ اعمال می شود، در این جهت لغزش نمی تواند صورت گیرد.)

توضیح. در اینجا ضرب داخلی می تواند به کار رود ولی فقط برای بلورهای مکعبی استفاده می شود.

□ مثال ۴-۳-۱۲ سیستم لغزش موجود در سیستمهای لغزش $\{111\}$ $\langle\bar{1}10\rangle$ فلزات fcc را باشکل نشان دهید.

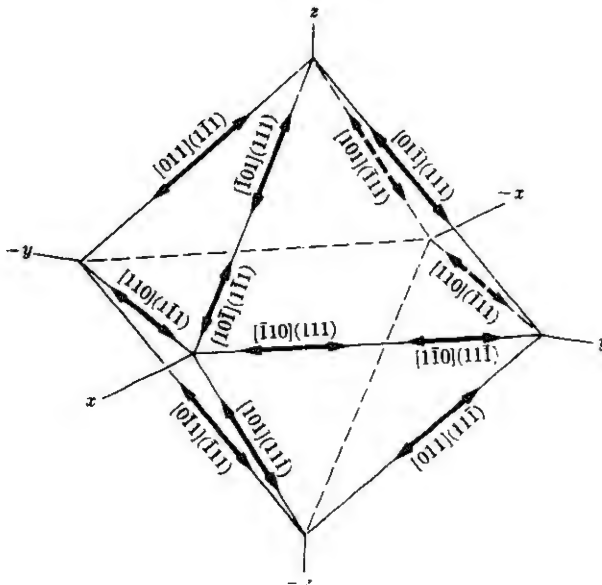
حل: شکل ۴-۳-۷ را ببینید. هر یک از چهار صفحه مجموعه $\{111\}$ سه جهت لغزش دارد. بنابراین داریم

$$\begin{array}{llll} [110](\bar{1}11) & [110](1\bar{1}1) & [110](11\bar{1}) & [110](\bar{1}\bar{1}1) \\ [10\bar{1}](111) & [10\bar{1}](1\bar{1}1) & [10\bar{1}](11\bar{1}) & [10\bar{1}](\bar{1}\bar{1}1) \\ [0\bar{1}1](111) & [0\bar{1}1](1\bar{1}1) & [0\bar{1}1](11\bar{1}) & [0\bar{1}1](\bar{1}\bar{1}1) \end{array}$$

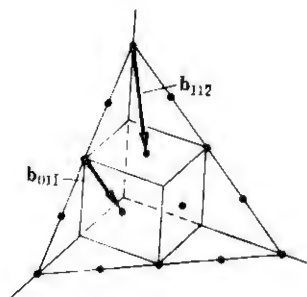
توضیح. صفحات عقب موازی صفحات جلویی اند و بنابراین همان سیستمهای لغزش را دارند. مثلاً $[110](\bar{1}11)$ همان سیستم لغزش $[110](1\bar{1}1)$ است. ▲

□ مثال ۴-۳-۴ هر دو جهت $[01\bar{1}]$ و $[1\bar{1}2]$ در صفحه (111) آلومینیم fcc قرار می گیرند. بنابراین هر دو لغزش (111) $[01\bar{1}]$ و (111) $[1\bar{1}2]$ را در نظر می گیریم. الف) شکلی از صفحه (111) بکشید و بردارهای واحد لغزش $[01\bar{1}]$ و $[1\bar{1}2]$ را نشان دهید؛ ب) انرژی خطوط نابجایی حاوی این دو بردار تغییر مکان را باهم مقایسه کنید.

حل: الف) شکل را ببینید (شکل ۴-۳-۸).



شکل ۴-۳-۷ سیستم لغزش مربوط به $\{111\}$ $\langle 1\bar{1}0\rangle$. (مثال ۴-۳-۳ را ببینید.)



شکل ۸-۴-۶ مثال ۴-۴-۶ را ببینید.

ب) با در نظر گرفتن رابطه (۴-۴-۶)

$$\frac{E_{011}}{E_{112}} = \frac{IGb_{011}^2}{IGb_{112}^2}$$

هر دو دارای صفحه لغزش (۱۱۱) هستند؛ بنابراین مدول برشی مشابهی به کار می رود.
بر اساس واحد طول l

$$\begin{aligned} \frac{E_{011}}{E_{112}} &= \left(\frac{b_{011}}{b_{112}} \right)^2 \\ &= \left[\frac{(a/\sqrt{2})}{(a\sqrt{6}/2)} \right]^2 = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

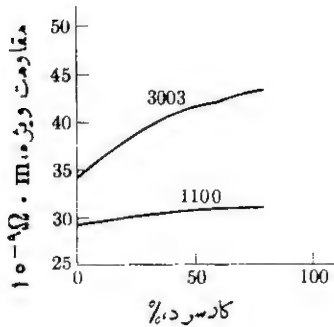
$$E_{011} = \frac{1}{3} E_{112}$$

توضیح. با این نسبت ۱/۳، بین این دو سیستم لغزش بالقوه برای فلزات fcc، لغزش با اولی بسیار ساده تر صورت می گیرد.

۵-۶ خواص فلزاتی که تغییر شکل پلاستیکی یافته اند

تغییر شکل پلاستیکی ساختار داخلی فلز را تغییر می دهد؛ بنابراین انتظار می رود که تغییر شکل، خواص فلز را نیز تغییر دهد. این تغییر خاصیت رامی توان با اندازه گیری حساسیت ثابت کرد. ساختار اعوجاج یافته، میانگین مسیر آزاد حرکت الکترون ها را کاهش می دهد (بخش ۲-۵) و بنابراین مقاومت بالا می رود (شکل ۶-۵-۱).

دومین تغییری که در خواص به وجود می آید و از نظر مهندسی اهمیت خیلی بیشتری دارد، استحکام است. فلزاتی که به طور پلاستیکی تغییر شکل یافته اند همان طور که در فصل ۱ دیدیم قوی تر می شوند. از آنجا منحنی s/e شکل ۱-۲-۱ (ج) با بیشتر شدن استحکام تسلیم، به طور مداوم بالا می رود.



شکل ۶-۵-۱: مقاومت و سفتی الکتریکی
بر حسب کار سرد (آلیاژهای کار شده آلومینیم)؛
۹۹٫۹ Al؛ ۱۱۰۰ = ۲Mn؛ ۳۰۰۳ = ۰٫۰۳٪
بقیه Al (برای تعریف کار سرد رابطه
(۶-۵-۱) را ببینید).

در شکل ۶-۵-۱ مثل سایر حالات، بهتر است درصد کار سرد را به عنوان شاخص تغییر شکل پلاستیکی در نظر بگیریم. کار سرد، مقدار کرنش پلاستیکی به وجود آمده در حین انجام فرایند است که توسط درصد کاهش سطح مقطع حاصل از تغییر شکل نوشته می شود؛ یعنی

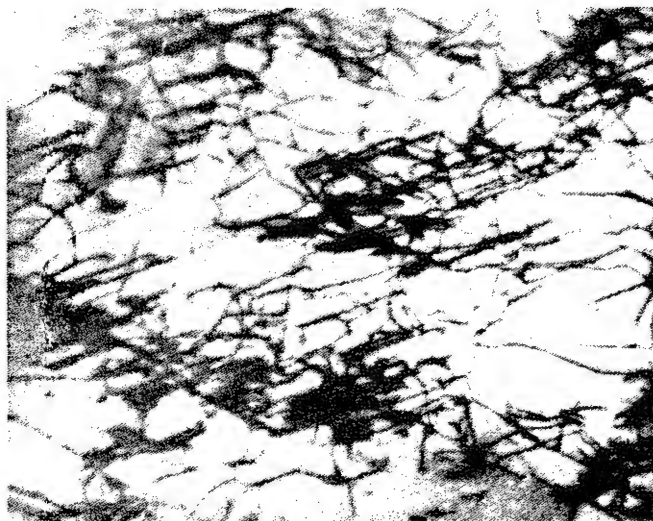
$$\%CW = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] 100 \quad (۶-۵-۲)$$

که در آن A_0 و A_f به ترتیب سطوح اولیه و نهایی است.

کرنش پلاستیکی، مس موجود در شکل ۶-۵-۲ تغییر شکل پلاستیکی یافته است. تغییر شکل پلاستیکی آثار صفحات لغزش در سطحی که قبلاً پرداخت شده، جلوه گر می شود. اثر تغییر شکل پلاستیکی در میکروسکوپ الکترونی نیز قابل مشاهده است. شکل ۶-۵-۳ نشان دهنده تغییرات در فولاد زنگ نرزی است که روی آن شدیداً کار سرد انجام شده است. تغییر مسیر صفحات، نشان دهنده نابجاییهاست؛ تعداد و طول آنها با انجام کار سرد اضافی افزایش بسیار می یابد. طبق شکل ۶-۵-۴، طول کلی خطهای نابجایی آثار قابل ملاحظه ای روی تنش

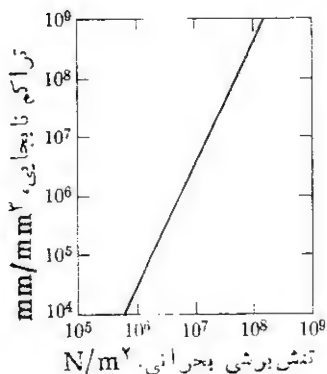


شکل ۶-۵-۳: مس چند بلوری که تغییر شکل پلاستیکی یافته است (۲۵X)، آثار صفحات لغزش در سطح پرداخت شده فلز آشکار است.

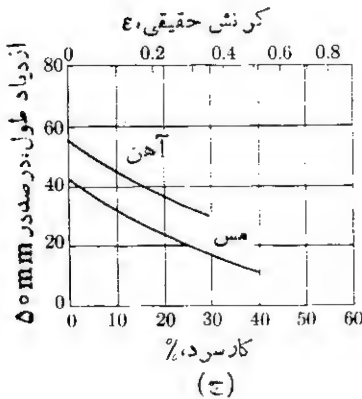
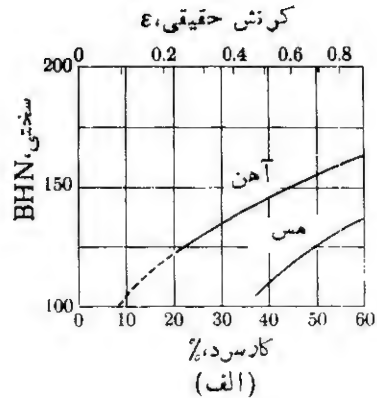
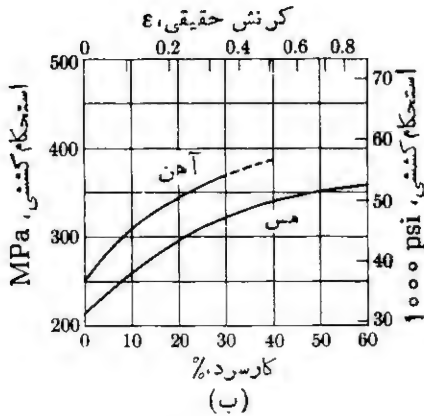


شکل ۳-۵-۶ نابجایی در فلزاتی که تغییر شکل پلاستیکی یافته‌اند (فولاد زنک‌زن، $\times 30000$) تغییر شکل اضافی، نابجاییهای بیشتری به وجود می‌آورد. همچنین افزایش نابجاییها، مانع از تغییر شکل بیشتر می‌شود. نتیجه آن کرنش سختی است.

برشی دارد. نتیجه می‌گیریم که اگر چه نابجاییها علت اصلی تغییر شکل پلاستیکی‌اند (شکل ۳-۵-۶)، ولی مانع حرکت سایر نابجاییها نمی‌شوند. گیر کردن نابجاییها با «فشرده‌گی ترافیک»، تنش برشی بحرانی، τ_c ، و بنابراین استحکام مواد را افزایش می‌دهد. داده‌های مربوط به نوع ارائه شده در شکل ۴-۵-۶ به صورت اطلاعات مهندسی عملیتر در شکل‌های ۵-۵-۶، ۶-۵-۶ و ۷-۵-۶ دیده می‌شود.



شکل ۴-۵-۶ چگالی نابجایی بر حسب تنش برشی بحرانی. افزایش تعداد نابجاییها مانعی در راه حرکت نابجایی به وجود می‌آورد.



شکل ۵-۵-۶ کار سرد بر حسب خواص مکانیکی (آهن و مس)، کار سرد، مقدار کرنش پلاستیکی است که با کاهش سطح مقطع نشان داده می‌شود (رابطه ۵-۶-۱).

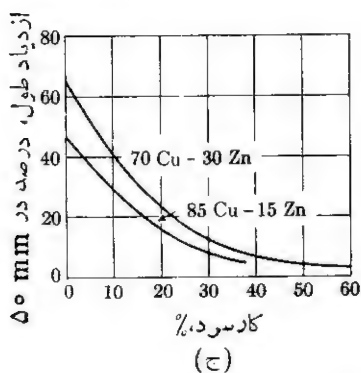
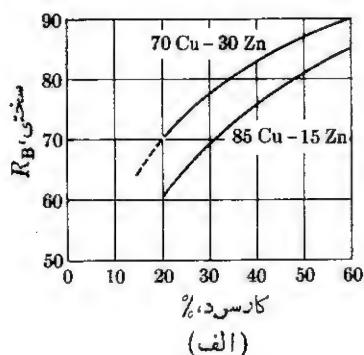
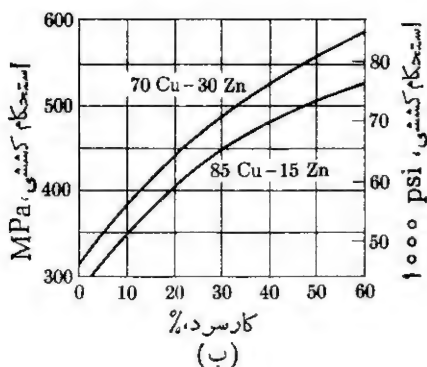
افزایش سختی که از تغییر شکل پلاستیکی به وجود می‌آید کرنش سختی نامیده می‌شود. آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهند که این افزایش سختی با افزایش استحکام کششی و استحکام تسلیم همراه است. از طرف دیگر کرنش سختی انعطاف پذیری را کم می‌کند، زیرا قسمتی از تغییر شکل در حین کار سرد و قبل از آنکه علامت سنج (شکل ۵-۲-۱) روی میله آزمایش قرار داده شود، به وجود می‌آید. پس در حین آزمایش، انعطاف پذیری کمتری مشاهده می‌شود. فرایند کرنش سختی، استحکام تسلیم را بیشتر از استحکام کششی افزایش می‌دهد (شکل ۵-۶-۷)، و با افزایش مقدار کار سرد، هر دو به استحکام شکست نزدیک می‌شوند.

مثال ۵-۶-۱ سیم آهنی تسابکاری شده‌ای ابتدا ۱٫۲۳ میلی‌متر قطر دارد. این سیم با کشیده شدن از میان قالبی که قطر سوراخ آن ۱٫۰۴ میلی‌متر است، سردکاری می‌شود. الف) انعطاف پذیری سیم قبل از کشیدن چقدر است؟ ب) بعد از کشیدن چطور؟

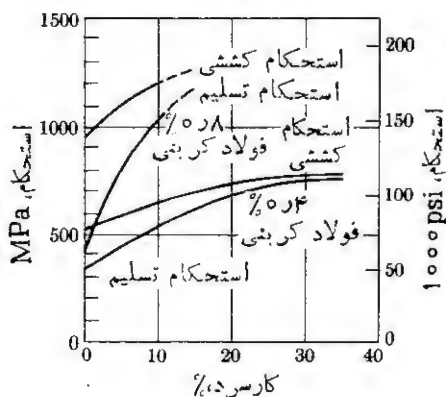
حل: الف) از شکل ۵-۵-۶ (ج)

۵۵٪ ازدیاد طول (۵۰ میلی متر)

$$\text{ب) کارسرد} = \frac{(\pi/4)(1.23)^2 - (\pi/4)(1.04)^2}{(\pi/4)(1.23)^2} = 0.285 \text{ (یا } 28.5\%)$$



شکل ۶-۵-۶ کارسرد بر حسب خواص مکانیکی (برنج).



شکل ۷-۵-۶ کارسرد بر حسب استحکام فولادهای پر کربن.

از شکل ۵-۵-۶ (ج)

۳۰٪ ازدیاد طول (۵۰ میلی متر)

توضیح. معمولا مقدار محدودی برون یابی مجاز است. همچنین می توان بین منحنیها برون یابی کرد و بدین وسیله داده های مربوط به سایر آلیاژها را به دست آورد؛ مثلا اگر شکلیهای ۶-۵-۶ و ۵-۵-۶ با هم به کار گرفته شوند برای $\text{Cu}-20\text{Zn}$ ۸۰ در شکل ۶-۵-۶ یا برای $\text{Cu}-10\text{Zn}$ ۹۰ می توان این داده ها را به دست آورد. ▲

مثال ۶-۵-۲ مس یا برنج سردکاری شده را می توان در مسواری با مشخصات $S_t \geq 345 \text{ MPa}$ و انعطاف پذیری بیشتر از ۲۰٪ ازدیاد طول در ۵۰ میلی متر به کار برد یک فلز را انتخاب کنید.

حل: داده های سردکاری، مشخصات زیر را نشان می دهند

برنج (۷۰-۳۰)	برنج (۸۵-۱۵)	مس	شکل
۶-۵-۶	۶-۵-۶	۵-۵-۶	
$\geq 4\% \text{CW}$	$\geq 9\% \text{CW}$	$\geq 40\% \text{CW}$	استحکام کششی
$\leq 23\% \text{CW}$	$\leq 16\% \text{CW}$	$\leq 24\% \text{CW}$	انعطاف پذیری
			(در صد ازدیاد طول)
$23\% \text{CW} - 4\%$	$16\% \text{CW} - 9\%$	—	گستره

توضیح. در این حالت برنج انتخاب می شود. اگر سایر عوامل مشابه باشد، برنجی که روی بیشتری دارد ($\text{Cu}-30\text{Zn}$ ۷۰) برگزیده می شود. زیرا روی از مس ارزانتر است. علاوه بر این گستره $23\% \text{CW} - 4\%$ در حین انجام فرایند روی فلز، انعطاف پذیری بیشتری نشان می دهد. در اینجا CW علامت انقباضی کاد سرد است. ▲

۶-۶ تبلور مجدد

تبلور مجدد فرایند رشد بلورهای جدید از بلورهایی است که قبلا تغییر شکل یافته اند. بلورهایی که تغییر شکل پلاستیکی یافته اند، مثل آهنیایی که در شکلهای ۶-۵-۲ و ۶-۵-۳ دیده می شوند، نسبت به بلورهای بدون کرنش، انرژی بیشتری دارند زیرا دارای نابجاییها و عیوب نقطه ای اند. در صورتی که مرئییتی پیدا شود آتمیا برای به وجود آوردن آرایه کاملتر و بدون کرنش تغییر مکان می دهند. چنین فرصتی وقتی به دست می آید که بلورها

توسط فرایندی به نام قاپکازی در دمای بالا قرار گیرند. نوسانات گرمایی شبکه در دماهای بالا موجب نوآرایی آنها و ایجاد دانه‌هایی با اعوجاج کمتری می‌شود. شکل ۱-۶-۱ به شرف این تبلور مجدد را نشان می‌دهد.

در قطعه‌ای برنجی که ۳۳٪ سردکاری شده کرنش سختی به وجود آمده است [شکل ۱-۶-۲ (الف)]. چندین نمونه از آن تا 580°C (1076°F) به مدت چند ثانیه گرم شده‌اند. دانه‌های جدید، یعنی بلورهای جدید برنج FCC، در نمونه‌ای که فقط به مدت ۳ ثانیه گرم شده است دیده می‌شود [شکل ۱-۶-۲ (ب)]. تبلور مجدد ابتدا در طول نوارهای صفحه‌های لغزش قبلی آغاز می‌شود. در مدت ۴ ثانیه، تقریباً عمل تبلور مجدد به نیمه می‌رسد [شکل ۱-۶-۲ (ج)]. و در ۸ ثانیه برنج به طور کامل تبلور مجدد می‌یابد [شکل ۱-۶-۲ (د)]. اگر بلورهای تازه شکل آخری را با میکروسکوپ الکترونی بررسی کنیم، درمی‌یابیم که کاهش بسیاری در تعداد نابجاییها به وجود آمده است، همچنین سختی به طور قابل توجهی افت کرده و از مقدار اولیه 165 BHN به کمتر از 100 BHN رسیده است.

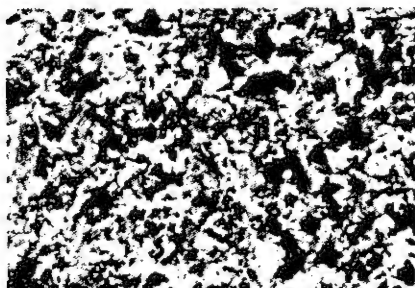
دماهای تبلور مجدد، فرایند تبلور مجدد به حرکت نوآرایی اتمی نیاز دارد. این نوآرایی برای تبلور مجدد در دماهای بالا آسانتر صورت می‌گیرد. در حقیقت در شکل ۱-۶-۲



(ب) ۳ ثانیه در 580°C (1076°F)



(الف) ۳۳٪ سردکاری

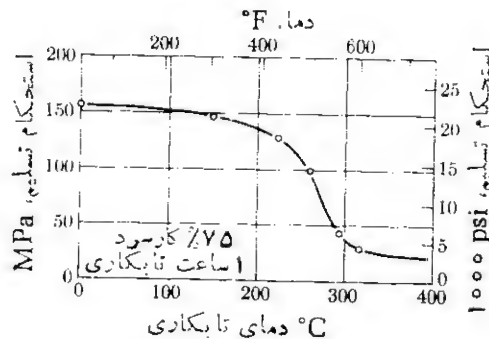


(د) ۸ ثانیه در 580°C



(ج) ۴ ثانیه در 580°C

شکل ۱-۶-۲ تبلور مجدد برنج کرنش سختی شده ($\times 40$).

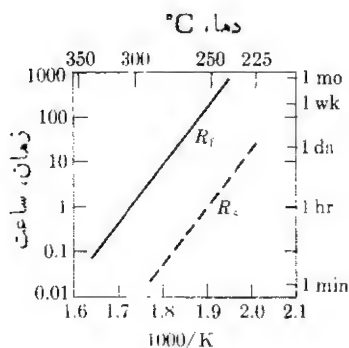


شکل ۶-۶-۲ استحکام تسلیم بر حسب تبلور مجدد (آلومینیوم). ابتدا ۷۵٪ سردکاری شده است، فلز به مدت یک ساعت تا دمای ذکر شده مجدداً گرم شده است. این مدت برای تبلور مجدد فلز در 300°C و بالاتر کافی است. استحکام تسلیم کاهش می‌یابد و کرنش سختی با ایجاد دانه‌های جدید از بین می‌رود.

می‌بینیم که وقتی نمونه‌ای به مدت یک ساعت در 300°C (570°F) نگه داشته می‌شود کاهش قابل ملاحظه‌ای در استحکام آن به وجود می‌آید. اگر در آغاز ۷۵٪ سردکاری شده باشد، این نمونه در این مدت تقریباً به طور کامل تبلور مجدد یافته است. در عوض نمونه‌هایی که به مدت یک ساعت در دماهای زیر 200°C (400°F) نگه داشته می‌شوند تقریباً تمام استحکام بالای خود را که در حین ۷۵٪ سردکاری به دست آورده‌اند حفظ می‌کنند. بنابراین دمای تبلور مجدد، T_R ، به دمایی گفته می‌شود که در آن میکروساختار و استحکام شدیداً تغییر کنند؛ در این مورد T_R تقریباً 270°C است.

دمای تبلور مجدد توسط چندین عامل تعیین می‌شود. رقم مطلوب آن است که T_R بین سدهم و شش‌دهم دمای مطلق ذوب، K ، یعنی $T_m/3$ تا $T_m/6$ بوده باشد. اساس این عمومیت آن است که نفوذپذیری D برای خود نفوذی مستقیماً به دمای ذوب فلز بستگی

* در دماهای کمی پایین‌تر از دمای تبلور مجدد، کاهش اندکی در استحکام و بهبود قابل ملاحظه‌ای در رسانندگی الکتریکی به وجود می‌آید که بازتابی ناامیده می‌شود. علت ایجاد این تغییرات در دمای پایین‌تر آن است که در داخل بلورهای که در آنها کرنش به وجود آمده است عیوب نقطه‌ای (تهیجایها، اتم‌های بین‌نشین و...) که توسط کار سرد به وجود می‌آیند) به طرف لبه‌های نابجایی حرکت می‌کنند، عیوب نقطه‌ای اثر قابل ملاحظه‌ای روی تغییر شکل نمی‌گذارند؛ بنابراین در این مرحله بازبایی فقط انعطاف‌پذیری اندکی به وجود می‌آید، میانگین مسیر آزاد الکترون‌ها با ناپدید شدن عیوب نقطه‌ای بلندتر می‌شود؛ بنابراین با از بین رفتن آنها، مقاومت افت می‌کند.



شکل ۳-۶-۶ زمان تبلور مجدد، برحسب دما (آلومینیم، ۷۵٪ سردکاری شده). خط چین، آغاز تبلور مجدد، R_s . خط پر، پایان تبلور مجدد، از رابطه آرنیوس ($\ln t$) برحسب $(1/T)$ پیروی می‌شود زیرا تبلور مجدد به حرکت اتمها نیاز دارد.

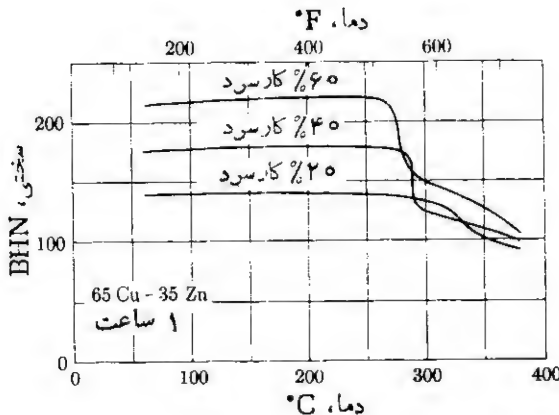
دارد. ولی زمان عامل دومی است که بر دمای تبلور مجدد اثر می‌گذارد. مثلاً طبق شکل ۳-۶-۶ تبلور مجدد آلیاژ آلومینیم خالص تجارتنی که ۷۵٪ سردکاری شده در 350°C (۶۲۳ K و 622°F) در مدت یک دقیقه کامل می‌شود ولی در 300°C به ۶۰ دقیقه و در 230°C به ۴۰ روز نیاز دارد. تعجبی ندارد زیرا شار اتمها به نفوذپذیری بستگی دارد (معادله ۴-۷-۱، الف)، که آن هم تابعی از دماست (معادله ۴-۷-۳). این امر به ما امکان می‌دهد با استفاده از نمودار آرنیوس ($\ln t$ برحسب $1/T_R$)، طبق شکل ۳-۶-۶، دمای تبلور مجدد را به زمان ارتباط دهیم.

عامل سومی که بر دمای تبلور مجدد اثر می‌گذارد مقدار کرنش سختی است. مطابق با داده‌های سختی شکل ۳-۶-۶، دمای تبلور مجدد از 320°C (600°F) برای برنج ۳۵-۶۵ با ۲٪ کارسرد تا تقریباً 280°C (535°F) برای همین برنج با ۶۰٪ کارسرد (هر کدام پس از یک ساعت تابکاری)، افت می‌کند. این مطلب نشان می‌دهد فلزی که کرنش سختی زیادی شده است نسبت به فلزی که اندکی سردکاری شده انرژی ذخیره بیشتری به شکل تهیجی و نابجایی دارد (شکل ۴-۴-۳). با دسترسی به این انرژی، اتم برای نوآرایی اتمی و تشکیل دانه‌های تابکاری شده به انرژی گرمایی کمتری نیاز دارد. یعنی تبلور مجدد می‌تواند در دمای کمتری صورت گیرد.

بالاخره، مواد خالص نسبت به محلولهای جامد در دمای پایینتری تبلور مجدد می‌یابند. بنابراین سیم برقی که از مس خالص است از سیمی برنجی که به همان نسبت تغییر شکل یافته، بسیار ساده‌تر تابکاری می‌شود؛ اگر چه دمای ذوب عکس این مطلب را پیش‌گویی می‌کند. در اینجا اساس اصول حرکت نابجاییها را به‌طور مفصل شرح نمی‌دهیم.

گرمکاری در مقابل سردکاری در فلزات. در عملیات تولید، که در شکلهای ۲-۲-۶ و

* حل مسئله ۴-۷-۱۴ مقادیر نفوذپذیری را در T_m ۶۰۰ درجه برای آهن، مس و نقره به ترتیب ۱۵-۱۷۰۳، ۱۵-۱۷۰۳ و ۱۵-۱۷۰۳ مترمربع در ثانیه داده است. (همه این محاسبات برای ساختار fcc انجام شده است و بنابراین می‌توان آنها را مستقیماً پایه مقایسه کرد.)



شکل ۶-۶-۴ نرم شدن در حین تابکاری (برنج ۶۵ Cu-۳۵ Zn). پس از گرمایش به مدت یک ساعت تا دمای مشخص شده، سختیها در 20°C معین شده‌اند، پرنجی که کرنش سختی بیشتری شده در دمای پایینتر و با انرژی گرمایی کمتری نرم می‌شود.

۲-۳-۶ شرح داده شد، تفاوت بین گرمکاری و سردکاری تنها در دمای آنها نیست، بلکه به رابطه دمای عملیات با دمای تبلور مجدد نیز مربوط می‌شود. به فرایندهای شکل دانی که در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد انجام می‌شوند، گرمکاری و به فرایندهای شکل دانی که پایینتر از این دما انجام می‌شوند سردکاری گفته می‌شود. بنابراین دمای سردکاری مس ممکن است از دمای گرمکاری سرب بیشتر باشد.

انتخاب دمای تبلور مجدد به عنوان نقطه متمایز کننده گرم و سردکاری از لحاظ تولید کاملاً منطقی است. زیر دمای تبلور مجدد، با تغییر شکل بیشتر در حین انجام فرایند فلز سخت تر و ترد تر می‌شود، توان بیشتری برای تغییر شکل لازم است و احتمال بیشتری برای ترک خوردن در حین انجام فرایند وجود دارد. بالای دمای تبلور مجدد، فلز خود به خود در حین یا بلافاصله پس از انجام فرایند کار مکانیکی، تسابکاری می‌شود، بنابراین نرم و نسبتاً انعطاف پذیر باقی می‌ماند.

اهمیت سردکاری و تابکاری از نظر مهندسی. کرنش سختی به وسیله کار سرد برای مهندس طراح در درجه اول اهمیت قرار دارد. این کار استفاده از قطعات کوچکتر، با استحکام بیشتر را میسر می‌سازد. البته محصول نباید در دماهایی که موجب تابکاری فلزات می‌شود به کار رود.

کار سرد مقدار تغییر شکل پلاستیکی را که در حین عملیات شکل دادن در فلز به وجود می‌آید، کاهش می‌دهد. فلز سردکاری شده سخت تر و ترد تر، برای کار بیشتر به توان بیشتری نیاز دارد و در معرض خطر ترک خوردگی است. بنابراین چرخه های کار سرد - تابکاری

برای كمك به توليد به كار می روند. مثال ۶-۶-۱ چنین فرایندی را شرح می دهد.
در حین كار سرد فقدان انعطاف پذیری اثر جنبی مفیدی در ماشینكاری دارد، به علت انعطاف پذیری كمتر، براده ها آسانتر می شكند (شكل ۶-۶-۵) و كار برش ساده تر صورت می گیرد. در نتیجه معمولا برای فلزی كه لازم است در ماشینهای اتوماتيك پیچی یریده شود، سردكاری توصیه می شود.

مثال ۶-۶-۱ مفتولی از برنج ۳۰-۷۰ باید قطر ۵۰ mm در؛ استحكام كشی بیشتر از ۴۲۰ MPa و ازدیاد طول بیشتر از ۱۸٪ در ۵۰ mm داشته باشد. این مفتول از مفتول ضخیمتر ۹۰ mm توسط كشیدن تولید می شود. مراحل انجام فرایند نهایی را برای تولید مفتول ۵۰ mm مشخص کنید.

حل: از شكل ۶-۵-۶،

۱۶٪ $CW > S_1$ ؛ ۲۲٪ $CW <$ برای ازدیاد طول.

برای مرحله آخر كشیدن از ۲۰٪ سردكاری استفاده می شود. از رابطه (۶-۵-۱)

$$0.20 = \frac{d^2 \pi / 4 - (50)^2 \pi / 4}{d^2 \pi / 4}$$

$$d = 56 \text{ mm} (= 0.22 \text{ in.})$$

توضیح. كار گرم از ۹۰ mm تا ۵۶ mm (یا كار سرد و تا بكاری در يك یا چند چرخه).
مفتول باید در قطر ۵۶ mm تا بكاری شود سپس با ۲۰٪ كار سرد به قطر ۵۰ mm برسد. ▲



(ب)



(الف)

شكل ۶-۶-۵ برش زائده های فلز با ماشین ابزار. فلز كرنش سختی شده در (الف) براده های بهتری را تولید می كند، در حالی كه فلز تا بكاری شده در (ب) زائده های يك تكه ایجاد می كند.

مثال ۶-۶-۲ رابطه زمان-دما برای تبلور مجدد کامل آلومینیم در شکل ۶-۶-۳ از رابطه نوع آرنیوس پیروی می‌کند. رابطه تجربی متناسب با آن را به دست آورید.

حل: از منحنی شکل ۶-۶-۳ در 250°C (523K)

$$t = 200\text{ hr} \quad \text{و} \quad T^{-1} = 1.91 \times 10^{-3}$$

$$\ln 200 = C + \frac{B}{523}$$

در 327°C (600K)

$$t = 0.14\text{ hr} \quad \text{و} \quad T^{-1} = 1.67 \times 10^{-3}$$

$$\ln 0.14 = C + \frac{B}{600}$$

از حل این دو معادله

$$B = 30000\text{ K} \quad \text{و} \quad C = -52$$

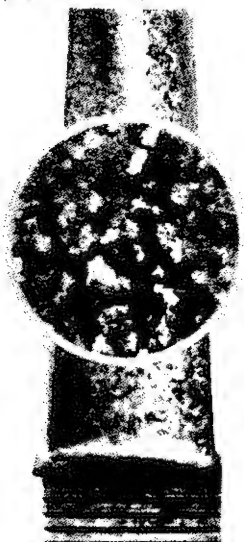
$$\ln t = -52 + \frac{30000\text{ K}}{T}$$

توضیح. درست همان‌طور که زوجهای نفوذی جدول ۴-۷-۲ مقادیر D و E مخصوص به خود را داشتند. مقادیر B و C فقط برای این آلومینیم خالص تجارنی که ۷۵٪ سردکاری شده است به کار می‌رود. (برای جزئیات بیشتر معادلات (۱۰-۱-۱) و (۱۰-۱-۲) را ببینید.)

۶-۶ رفتار فلزات چندبلوری

فلزی که در قطعه ریختگی (شکل ۶-۷-۱) یا شمش به حالت جامد درآمده است حاوی دانه‌های بسیاری است که هر کدام بلور جداگانه‌ای به شمار می‌رود. همین امر برای میله، مفتول، ورق، لوله، و... نیز صحت دارد. اندازه دانه‌ها روی تغییر شکل مواد اثر دارد. به طور خلاصه در مقایسه با فلزاتی که دانه‌های درشت دارند، فلزات ریزدانه در دماهای پایین پراستحکامتر و در دماهای بالا ضعیفترند. در هر دو مورد این اثر در درجه اول نتیجه مقدار سطح مرزدانه‌هاست. همان‌طور که در بخش ۴-۴ ذکر شد، بین ابعاد متوسط دانه و سطح مرزدانه نسبت عکس وجود دارد.

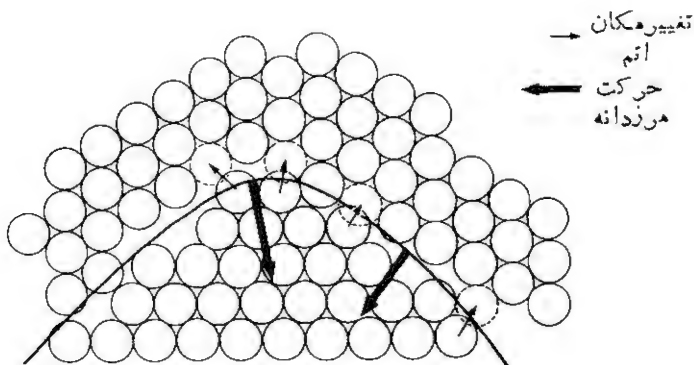
از آنجا که اندازه دانه تا حدی قابل کنترل است، ابتدا به رشد دانه‌ها و سپس به آثار اندازه دانه‌ها بر تغییر شکل، هم در دمای پایین و هم در دمای بالا، نظر خواهیم کرد.



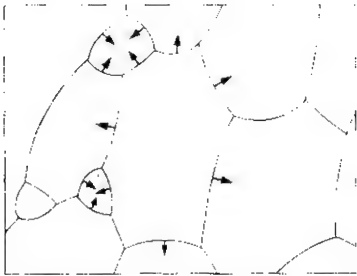
شکل ۶-۷-۱ فلز درشت دانه در پره‌های توربین ریخته‌گری شده، این پره‌ها در دماهای بالا به کار می‌روند؛ بنابراین سطح مرز دانه‌ها تا گسترش دانه‌های درشت در حین فرایند، به کمینه می‌رسند. در عوض، مرز دانه‌ها در دماهای پایین استحکام را افزایش می‌دهند.

رشد دانه‌ها در فلزات. اگر دما تحرك اتمی مهمی تولید نکند (بخش ۴-۷) میانگین اندازه دانه‌ها در فلز تک فاز با زمان افزایش می‌یابد. نیروی محرکه رشد دانه‌ها انرژی است که با عبور دانه‌ها از مرز دانه‌ای که سطح مقعر دارد به دانه‌ای با سطح محدب، آزاد می‌شود. در آنجا اتم به طور متوسط با تعداد بیشتری اتم، در فواصل بین اتمی متعادل، همسایه است (شکل ۶-۷-۲). در نتیجه مرز دانه به طرف مرکز انحنا حرکت می‌کند. از آنجا که دانه‌های کوچک نسبت به دانه‌های درشت سطوحی با تحدب بیشتر دارند، ناپدید می‌شوند زیرا دانه‌های بزرگتر را تغذیه می‌کنند (شکل ۶-۷-۳). نتیجه نهایی، رشد دانه است (شکل ۶-۷-۴).

تمام مواد بلورین، فلزات و غیر فلزات دارای این ویژگی‌های رشد دانه هستند. یخ



شکل ۶-۷-۲ حرکت مرز دانه‌ها. اتم‌ها به طرف دانه‌ای که سطح محدب دارد و در آنجا پایدارترند حرکت می‌کنند. در نتیجه مرز دانه‌ها به طرف مرکز انحنا تغییر مکان می‌یابند.



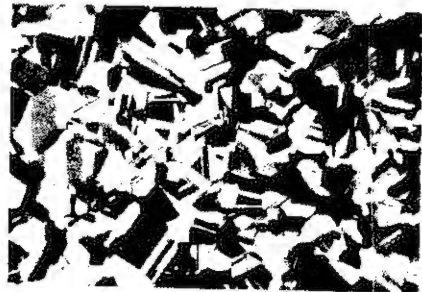
شکل ۶-۷-۳ رشد دانه. مرزدانه‌ها به طرف مرکز آنها حرکت می‌کنند. (علامتها) در نتیجه در آخر دانه‌های کوچک ناپدید می‌شوند.

حاصل از برف انباشته شده مثال جالبی در مورد رشد دانه‌هاست. دانه‌های برف به شکل تعداد زیادی بلور کوچک یخ در می‌آیند با گذشت زمان همانندشان را از دست می‌دهند و با بلورهای یخ دانه‌های بزرگتر جایگزین می‌شوند، تعداد کمی از بلورها با از بین رفتن بلورهای کوچکتر رشد می‌کنند.

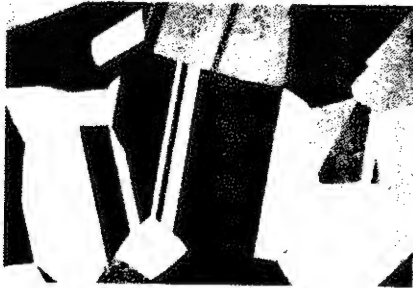
سرعت رشد به دما بستگی بسیار دارد. افزایش دما انرژی گرمایی را افزایش می‌دهد که آن نیز به نوبه خود به نفوذ از مرز دانه‌های کوچکتر به دانه‌های بزرگتر ممتاب می‌دهد. کاهش بعدی در دما حرکت مرز دانه‌ها را کندتر می‌کند، ولی آن را عکس نمی‌کند.



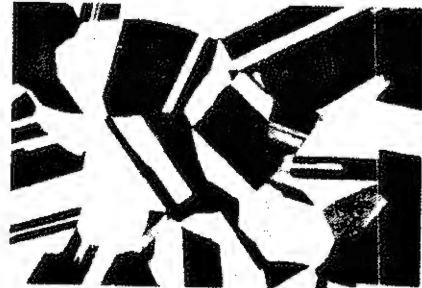
(ب) ۱ ساعت در 580°C (1076°F)



(الف) ۱۵ دقیقه در 580°C



(د) ۱ ساعت در 700°C (1292°F)



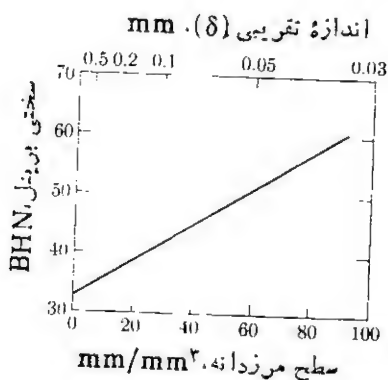
(ج) ۱۰ دقیقه در 700°C

شکل ۶-۷-۴ رشد دانه (برنج با بزرگنمایی ۴۰).

تنها راه کاهش (ریز کردن) اندازه دانه‌ها در آلیاژهایی که همیشه يك فاز دارند تغییر شکل پلاستیکی دانه‌ها و ایجاد دانه‌های جدید توسط تبلور مجدد است (بخش ۶-۶).

تغییر شکل در دماهای پایین. شکل ۵-۷-۶ سختی برنج ۳۰-۷۰ تا بکاری شده را به صورت تابعی از سطح مرزدانه نشان می‌دهد. مرزدانه‌ها جلوی لغزش را می‌گیرند زیرا نابجاییها با کوشش برای ورود به دانه جدید باید جهت حرکت خود را تغییر دهند. دانه مجاور بدون تغییر نسبت به دانه‌ای که لغزش در آن ایجاد شده می‌چرخد. (اگر دو دانه هم‌راستا باشند مرزدانه‌ای وجود نخواهد داشت.) بنابراین برای ادامه لغزش و عبور از مرزدانه نیروی بیشتری لازم است. معمولاً تجمعی از نابجاییها موجود است که همان اثر شلویی ترافیک در بزرگراه اصلی را دارد (شکل ۶-۷-۶).

□ تغییر شکل فلزات چندبلوری با تغییر شکل فلزات تک‌بلوری از جنبه دیگری هم متفاوت است. تک‌بلور شکل ۱-۴-۶ توسط بلورهای مجاور تحت فشار قرار نگرفته است. برای مقایسه شکل ۲-۵-۶ را ببینید. در این شکل واضح است که دانه‌های بزرگ مس در مرکز، مستقل از دانه‌های همسایه خود تغییر شکل پلاستیکی نمی‌یابند. در صورتی که دانه‌ها بخواهند همراه همسایه‌های خود و بدون ایجاد ترك یا شکافی تغییر شکل یابند، حداقل پنج سیستم (جدول ۱-۴-۶) باید همزمان باهم در داخل دانه عمل کنند. از آنجا که تمام



شکل ۵-۷-۶ سختی بر حسب رشد دانه (برنج ۳۰-۷۰ تا بکاری شده) دانه‌های بزرگتر با سطح مرزدانه کمتر، نرم‌ترند.

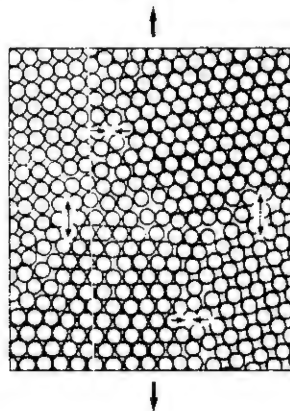


شکل ۶-۷-۶ تجمع نابجاییها. مرزدانه یسا سطح در دمای پایین مانع ادامه حرکت نابجاییها می‌شود. \perp = نابجایی ایله‌ای

صفحات لغزش به نحو مطلوبی قرار نگرفته‌اند [مثال ۶-۴-۲ (ب)]، علت این امر را در می‌یابیم که چرا فلزات bcc و fcc، با سیستم‌های لغزشی بیشتر، فلزات انعطاف‌پذیری‌اند؟ و فلزات hcp انعطاف‌پذیری کمتری دارند (جدول ۶-۴-۱).

□ **تغییر شکل در دماهای بالا.** در شکل ۶-۷-۵ دیدیم که فلزات ریزدانه در دماهای پایین سخت‌تر و بنابراین بر استحکامتر از فلزات درشت‌دانه‌اند. در دماهای بالا وضعیت عکس می‌شود. در بالاتر از دماهایی که اتم‌ها حرکت قابل توجهی را شروع می‌کنند، مرزدانه منشأ ضعف ماده است. با کمک شکل ۶-۷-۷ می‌توان آن را بیشتر درک کرد. این شکل طرحواره چندین دانه را که در جهت عمودی تحت کشش قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. اگر در یک جهت کشش وجود داشته باشد، در جهت عمود بر آن انقباض وجود دارد. (بدنسبت پواسون، بخش ۳-۶ رجوع کنید) بنابراین اتم‌ها در مرزدانه‌هایی که به صورت عمودی قرار گرفته‌اند تمرکز می‌یابند و فضای بین اتم‌هایی که در مرزهای افقی قرار گرفته‌اند بیشتر می‌شود. این امر موجب نفوذ از مرزهای افقی می‌شود، که نتیجه کلی آن تغییر تدریجی در شکل فلز است.*

کرنشی که شوح داده شده یکی از مکانیسم‌های خزش است. اگر دانه کوچکتر باشد یعنی سطح مرزدانه بیشتر باشد، خزش سریعتر صورت می‌گیرد. در طول مرزدانه‌های افقی



شکل ۶-۷-۷ مرزدانه‌ها و تغییر شکل (طرحواره). تحت کشش، در مرزدانه‌های عمودی تمرکز اتم‌ها به وجود می‌آید و اتم‌ها توسط نفوذ از آن خارج می‌شوند؛ مرزدانه‌های افقی اتم‌های تغییر مکان یافته را دریافت می‌کنند زیرا فضای اضافی در آنها به وجود آمده است. خزش حاصل عامل مهمی در کاربرد مواد در دماهای بالاست، که در آن اتم‌ها ساده‌تر نفوذ می‌کنند (شکل اصلی، شکل ۶-۴-۷ است).

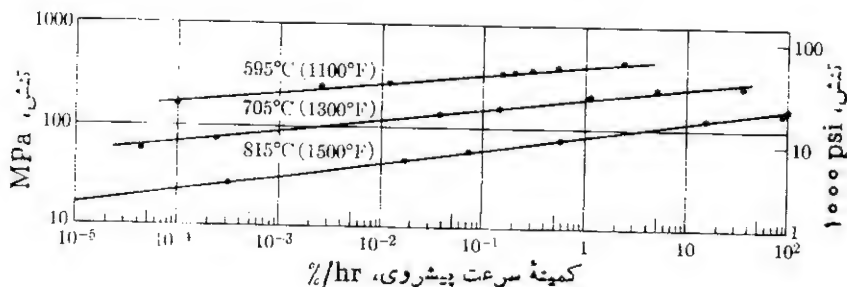
* نیروهای فشاری تغییرات مشابهی ولی در جهت عکس، ایجاد می‌کنند.

محل‌های بیشتری برای «غرق شدن» اتم‌ها وجود دارد و «منابع» تأمین اتم‌ها در مرز دانه‌های عمودی بیشتر است (شکل ۶-۷-۷). مسئله‌ای که حتی اهمیت بیشتری دارد آن است که فاصله‌های نفوذی در مواد ریز دانه کمتر است.

البته این مکانیزم خزش در دماهای پایین که در آن حرکت اتم‌ها قابل اغماض است صورت نمی‌گیرد، ولی با افزایش مقدار نفوذپذیری، D ، برای خود نفوذی، حرکت اتم‌ها به صورت تابع نمایشی افزایش می‌یابد (بخش ۴-۷). همانند تبلور مجدد دمای که در آن اثر اندازه دانه به این صورت تغییر می‌کند تابعی از زمان، استحکام پیوند، ناخالصی و ... است.

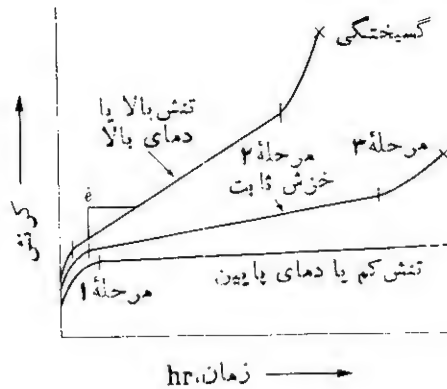
□ **کاربرد در دمای بالا.** همان‌طور که از نام آن پیداست، خزش فرایند ایجاد تدریجی کرنش است. سرعت آن از چند درصد در ساعت در سطوح تنش بالا یا در دماهای بالا، تا کمتر از ۰.۱٪ در ساعت* تغییر می‌کند (شکل ۶-۷-۸). این مقادیر کم است، ولی اهمیت آن را در طراحی نیروگاه‌ها یا راکتورهای اتمی در نظر بگیرید که باید سال‌ها در دمای بالا کار کنند. به همین ترتیب در توربین‌های گازی و در تجهیزاتی که باید بدون تغییر در اندازه‌ها تحت تنش‌های بالا و در دماهای بالا کار کنند تا بیشینه کارآیی تبدیل انرژی را داشته باشند، خزش اهمیت پیدا می‌کند.

می‌توانیم کرنش را به صورت تابعی از زمان برای تنش‌ها و دماهای مختلف رسم کنیم. شکل ۶-۷-۹ طرح‌واره است. اگر فلزی تحت تنش قرار گیرد، بلافاصله تغییر شکل کشسان می‌یابد. در صورتی که تنش یا دما بالا باشد تغییر شکل نیز بیشتر خواهد شد. در دوره کوتاه اول (مرحله ۱) در نقاطی که تمرکز تنش وجود دارد، در طول مرز دانه‌ها و در عیوب داخلی، تغییر شکل پلاستیکی اضافی، نسبتاً سریع به وجود می‌آید. این تغییر شکل اندک اولیه راه را برای کرنشی با سرعت نسبتاً ثابت تحت عنوان سرعت خزش، $\dot{\epsilon}$ ، باز



شکل ۶-۷-۸ داده‌های خزش فولاد زنگ‌زن نوع ۳۱۶، تنش‌های بالاتر و دماهای بالاتر. سرعت خزش را بالا می‌برد.

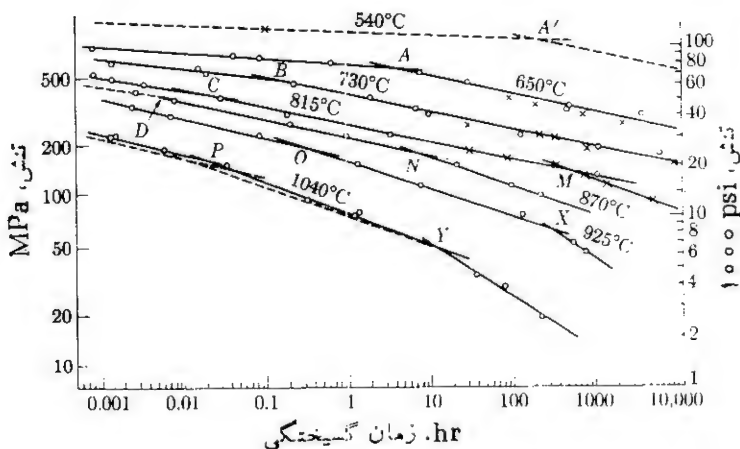
* تقریباً ۱٪ در سال.



شکل ۶-۷-۹ خزش. سرعت ثابت خزش در مرحله دوم، عمر مفید ماده را مشخص می‌کند.

می‌کند. مرحله دوم یعنی خزش ثابت تا مدت زیادی ادامه می‌یابد، تا کرنش کافی به وجود آمده و کاهش سطح و گلوپی پدید آید. با این تغییر سطح در بار ثابت، سرعت کرنش زیاد می‌شود تا شکست به وجود آید (مرحله ۳). اگر بار بتواند مطابق با کاهش حجم تغییر کند و بنابراین تنش ثابت بماند، سرعت خزش مرحله ۲ تا شکست ادامه می‌یابد.

در شکل ۶-۷-۹ طرحواره روابط زیر دیده می‌شود: (۱) سرعت ثابت خزش با ازدیاد دما و تنش، هردو افزایش می‌یابد. (۲) کل کرنش در نقطه شکست نیز با این متغیرها افزایش می‌یابد. (۳) زمان قبل از شکست نهایی در اثر تنش گسیختگی، با افزایش دما و تنش اعمال شده کاهش می‌یابد (شکل ۶-۷-۱۰).



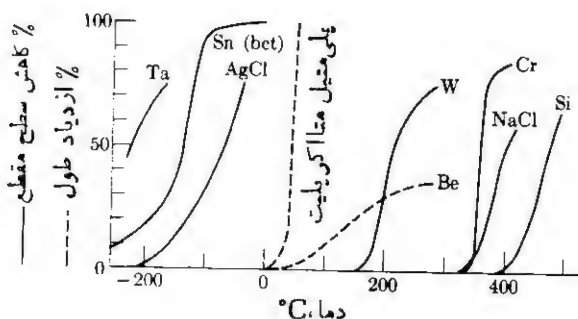
شکل ۱۰-۷-۶ داده‌های تنش گسیختگی. زمان شکستن با بالا رفتن تنش و دما کمتر می‌شود.

□ ۸-۶ شكست

آزمایش تنش-كرش (شكل ۱-۲-۲) باشكست پایان می‌یابد. قبل از شكست ممكن است تغییر شكل وجود داشته یا نداشته باشد. اگر تغییر شكل پلاستیکی به وجود آید شكست انعطاف‌پذیر اتفاق افتاده است در غیر این صورت شكست قرد است. چقرمگی مربوط به آن را می‌توان با (۱) اندازه‌گیری انعطاف‌پذیری (به صورت درصد ازدیاد طول یا درصد کاهش سطح مقطع) یا با (۲) انرژی جذب شده در آزمایش ضربه* نشان داد (شكل ۱-۲-۴).

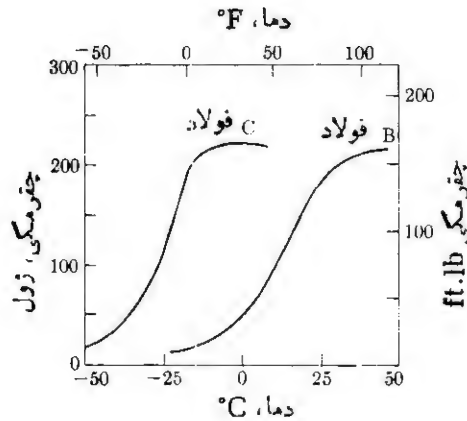
دمای انتقال. در بسیاری از مواد انتقال ترد-انعطاف پذیر مشاهده می‌شود. این مواد دارای دمای مشخصی برای تغییرند (شكلهای ۱-۸-۶ و ۲-۸-۶). در دماهای پایین ترك می‌تواند سریعتر از تغییر شكل پلاستیکی به وجود آید، بنابراین انرژی اندکی جذب می‌شود. در دماهای بالاتر، قبل از شكست با صرف انرژی تغییر شكل به وجود می‌آید. این ناپیوستگی در جذب انرژی از ویژگیهای فلزات bcc است؛ در نتیجه طراح برای استفاده از فولادها در دماهای پایین باید دقت کافی به عمل آورد.**

دمای انتقال با سرعت بارگذاری تغییر می‌کند. بنابراین در فولادی که به آهستگی تغییر شكل پیدا می‌کند ممكن است شكست انعطاف‌پذیر رخ دهد، در حالی که تحت ضربه ممكن است به صورت ترد بشکند، زیرا برای به وجود آمدن تغییر شكل پلاستیکی فرصتی وجود ندارد. داده‌های شكل ۲-۸-۶ برای بارگذاری ضربه‌ای است. این داده‌ها برای نمونه‌هایی باشكل هندسی استاندارد است، زیرا این را نیز می‌دانیم که انرژی لازم، به توزیع



شكل ۱-۸-۶ انعطاف‌پذیری بر حسب دما (آزمایشهای كشش). به استثنای فلزات fcc، بیشتر مواد در دماهای پایین انعطاف‌پذیری خود را به طور ناگهانی از دست می‌دهند. برای هر ماده‌ای هنگام افزایش سریع كرش مثلاً در بارگذاری ضربه‌ای دمای انتقال بیشتر است.

- * نتایج آزمایش ضربه گاهی به جای انرژی ضربه‌ای «استحکام ضربه‌ای» نامیده می‌شود.
- ** چقرمگی فلزاتی مثل مس و آلومینیم (fcc) با کاهش دما، به طور ناگهانی تغییر نمی‌کند.



شکل ۶-۸-۲ انتقال چقرمگی. برای هر فولادی دردمای پایین کاهش مشخصی در چقرمگی وجود دارد. دمای انتقال برای فولاد C (ریزدانه) بسیار کمتر از فولاد B (ناآرام) است.

سه بعدی تنش در همسایگی ترك بستگی دارد. مثلاً با وجود آنکه مقدار دقیق دمای انتقال بر حسب شکل هندسی تغییر می‌کند، ولی برای طراحی کشتیهایی که با استفاده از جوشکاری ساخته می‌شوند و در آبهای زمستانی شمال آتلانتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، آرشیتکتهای نیروی دریایی فولاد C در شکل ۶-۸-۲ را به فولاد B ترجیح می‌دهند. وقتی در فولادی با دمای انتقال بالا، ترکی به وجود می‌آید، با انرژی شکست کمی انتشار این ترك تا شکستن کامل کشتی ادامه می‌یابد. قبل از آنکه طراحان استفاده صحیح از روابط را یاد بگیرند و متخصصان مسالوروی دریابند که فولادهای ریزدانه در مقایسه با فولادهای درشت‌دانه دمای انتقال کمتری دارند، فجایع بسیاری به وجود آمد.

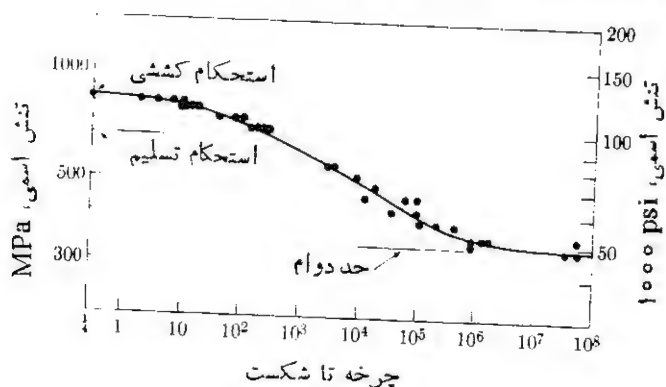
خستگی. نمونه‌های مستند بسیاری از شکست استوانه‌های چرخسان در نورینهای برق و در سایر تجهیزات مکانیکی که به نحو رضایتبخشی در مدت زمانی طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، دیده شده است. شکل ۶-۸-۳ یکی از این شکست‌ها را نشان می‌دهد. تنشهایی که ماده می‌تواند تحت بار چرخه‌ای تحمل کند خیلی کمتر از تنشهای بارگذاری استاتیکی است. از استحکام کشتی فقط می‌توان به صورت راهنمایی در طراحی ساختارهایی که تحت بار استاتیکی به کار می‌روند استفاده کرد. تعداد چرخه‌هایی که فلز در آن دوام می‌آورد، N ، با افزایش تنش، S ، کاهش می‌یابد. شکل ۶-۸-۴ منحنی کلی $S-N$ برای

* ابتدا گفته می‌شد که فلز خسته می‌شود و از خستگی می‌شکند. اکنون می‌دانیم که شکست دوائر خستگی نتیجه حرکت نقطه‌ای در میکروساختار است که موجب انتشار ترك می‌شود.

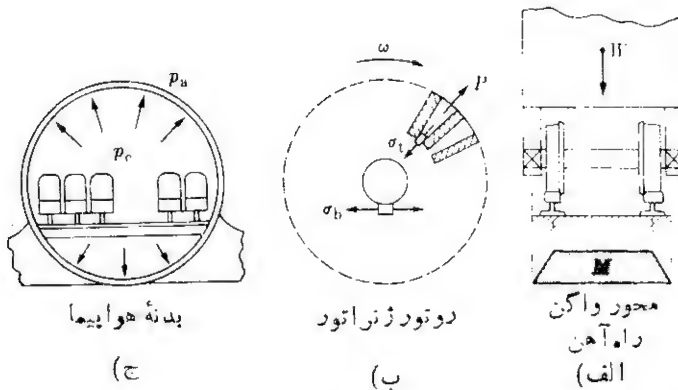


شکل ۶-۸-۳ شکست در اثر خستگی (در استوانه فولادی ۱۴ سانتی متری). شکست بسیار آهسته از سوراخ پیچ تنظیم در بالا شروع می شود. تقریباً ۹۰٪ سطح مقطع را در برمی گیرد و بعد سریعاً می شکند (پایین).

شکست فولادها در اثر خستگی است. در طراحی بارگذاری چرخه‌ای نامحدود، لازم است که تنش را به مقادیر زیر حد دوام این منحنی محدود کنیم. شکل ۶-۸-۵ سه نمونه از بارگذاری چرخه‌ای را نشان می دهد. محور واگن قطار تحت چرخه‌های تنش سینوسی بسیاری قرار می گیرد. نمونه‌هایی از تنشهای چرخه‌ای کم در روتور مولد برق یافت می شود. این واحد تحت عنوان واحد «عالی» در هنگامی که مقدار برق مورد نیاز در اوج است به کار می رود و در هر سال تا ۱۰۰۰۰ مرتبه روشن و خاموش



شکل ۶-۸-۴ منحنی $S-N$ (فولاد ۴۱۴۰ SAE یکساخت شده). $S-N$ = تنش چرخه‌ای بر حسب تعداد چرخه‌ها تا شکست. در حد دوام، تعداد چرخه‌ها به طور نامتناهی زیاد می شود.



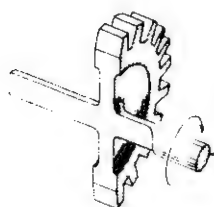
شکل ۵-۸-۶ نمونه‌هایی از بارگذاری چرخشی. (الف) محور واگن راه آهن؛ (ب) روتور مولد برق در حین روشن و خاموش شدن؛ (ج) بالا و پایین رفتن فشار در هواپیما. در مورد آخر ممکن است فقط با چند هزار چرخه مواجه شویم؛ ولی همان‌طور که در شکل ۵-۸-۶ دیده می‌شود، نمی‌توان استحکام تسلیم را در نظر گرفت.

می‌شود؛ هر بار، چرخه‌ای از تنش را در قاعده شکاف سیم‌پیچی و در میل مرغک اعمال می‌کند. به همین ترتیب بدنه هواپیما در هنگام بالا رفتن فشار پس از هر بار بلند شدن آن، تحت تنش قرار می‌گیرد، این تنش‌ها به محض آنکه هواپیما به زمین می‌نشیند بر طرف می‌شوند. ترک‌های ناشی از خستگی معمولاً از سطح آغاز می‌شوند، در جایی که خمش یا پیچش بیشترین تنش را به وجود آورده و در محلی که بی‌نظمی‌های سطحی موجب تمرکز تنش شده است. در نتیجه حد دوام نسبت به پرداخت سطحی بسیار حساس است (جدول ۵-۸-۶). آزمایش دقیق اولین مراحل انتشار ترک نشان می‌دهد که لغزش میکروسکوپی و غیر قابل برگشتی در هردانه به وجود می‌آید^{*} در اطراف این صفحات لغزش، کاهش تدریجی در انعطاف پذیری وجود دارد که موجب تشکیل ترک‌های میکروسکوپی می‌شود. این امر ممکن است پس از فقط ۱۰٪ تا ۲۰٪ از عمر نهایی فلز در اثر خستگی، صورت گیرد. در حین چرخه‌های باقیمانده ترک به آهستگی پیشرفت می‌کند؛ عاقبت سطح مقطع به حدی کاهش می‌یابد که شکست ناگهانی نهایی اتفاق می‌افتد (شکل ۵-۸-۶). در طراحی، هر نوع عاملی که موجب تمرکز تنش شود می‌تواند موجب شکست قبل از موعد شود. قبلاً در جدول ۵-۸-۶ اهمیت پرداخت سطحی را دریافتیم. محل‌هایی شبیه به سوراخ کلید و سایر شکافها (شکل ۵-۸-۶) نیز بحرانی‌اند. بالاخره توصیه می‌شود همان‌طور که شکل ۵-۸-۶ نشان می‌دهد گوشه‌ها پر شوند.

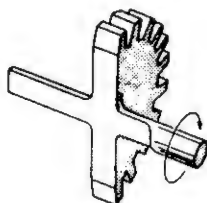
* این لغزش موجب ناصاف شدن سطح خارجی دانه می‌شود، حتی اگر به خوبی پرداخت شده باشد. سپس این امر موجب تمرکز بیشتر تنش می‌شود.

جدول ۶-۸-۱ پرداخت سطحی بر حسب حد دوام
(فولاد ۴۰۶۳ SAE، که تا $R_C ۴۴$ آب داده شده و باز پخت شده است.)

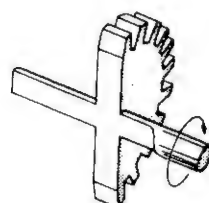
نوع پرداخت	صافی سطح μm	حد دوام MPa
سنگ محور	۰۰۲-۰۰۶	۶۳۰
پرداخت ماشینی	۰۰۳-۰۰۵	۷۲۰
سنگ تخت	۰۰۲-۰۰۳	۷۷۰
تمامکاری عالی (پرداخت شده)	۰۰۰۸-۰۰۱۵	۷۸۵
تمامکاری عالی (پرداخت شده)	۰۰۰۱-۰۰۰۵	۸۰۵



(الف) طراحی ضعیف



(ب) طراحی بهتر



(ج) طراحی بهتر

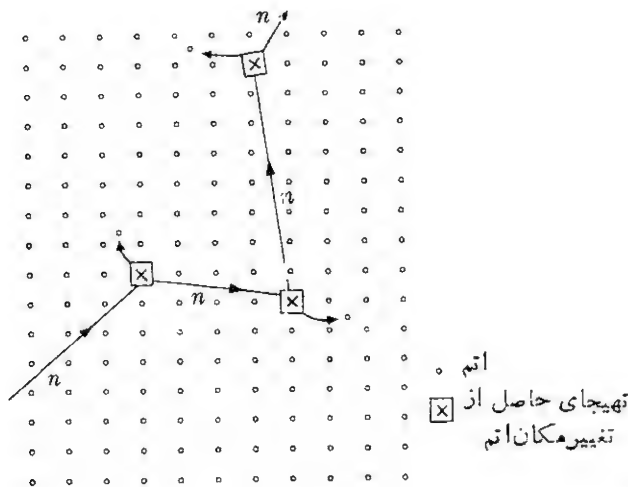
شکل ۶-۸-۶ طراحی گوشه‌های پر شده، به‌طور کلی استفاده از پر کردن گوشه‌ها در طراحیهای مهندسی مکانیک توصیه می‌شود. دیده می‌شود حتی با وجود آنکه مواد بیشتری تراشیده شده است، طرح (ج) بهتر از طرح (الف) است. البته اگر مواد پیش از جد تراشیده شود ممکن است شکست در اثر مکانیسم دیگری بجز خستگی صورت گیرد.

□ ۹-۶ زیانهای حاصل از تشعشع

انتخاب مواد، کلید طراحی موفقیت آمیز رئاكتورهای هسته‌ای است. در درجه اول در صورتی که مشکلی در آن ایجاد شود باید «در برابر شکست ایمن باشد» در درجه دوم محیط اطراف محل تشعشع ممکن است ساختار بسیاری از مواد را تغییر دهد. از آنجا که این تغییرات معمولاً موجب تغییر نامطلوب در خواص می‌شوند، آنها را تحت عنوان زیانهای حاصل از تشعشع نام می‌بریم. در این فصل فقط به تابش نوترون و اثرات آن روی فلز می‌پردازیم، ولی انواع دیگری از تشعشع مثل ذرات α (یون He^{2+})، اشعه β

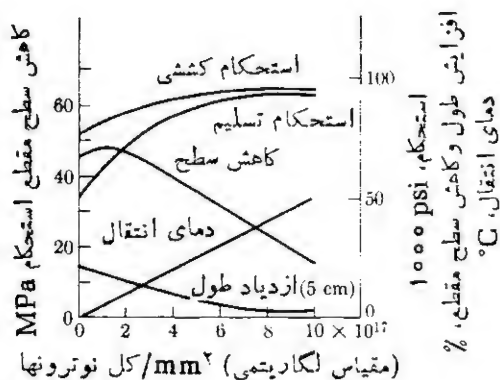
(الکترونهاي پرانرژی)، و اشعه γ نیز وجود دارد. در فصل ۷ خواهیم دید که تشعشع بر پلي مرها نیز اثر می گذارد.

برخورد نوترونها با اتمها. از آنجا که نوترونها بارندارند، اگر انرژی کافی به آنها داده شود می توانند بدون آنکه مانند اشعه β ، پروتون یا ذرات α جذب یونها شوند، به طور مستقیم از میان ماده عبور کنند. نوترونها فقط وقتی با اتمها برهم کنش می کنند که با هسته آن «برخورد» کنند و چنین برخوردی وقتی روی می دهد که از بسیاری از اتمها گذشته باشند. وقتی در بلور برخوردی روی می دهد، نوترون منحرف می شود، اتم (پایون) را از محل خود در بلور تغییر مکان می دهد و تهیجای و بین نشینی اتمی به وجود می آید (شکل ۶-۹-۱). از آنجا که هر برخوردی حرکت نوترون را کند می کند. برخوردها بیشتر می شود تا بالاخره نوترون توسط اتم گیر می افتد.*



شکل ۶-۹-۱ تغییر مکان اتم توسط نوترون. وقتی نوترونی با اتم برخورد می کند، قسمتی از انرژی برای حرکت دادن اتم از محل خود در شبکه به محل بین نشینی صرف می شود.

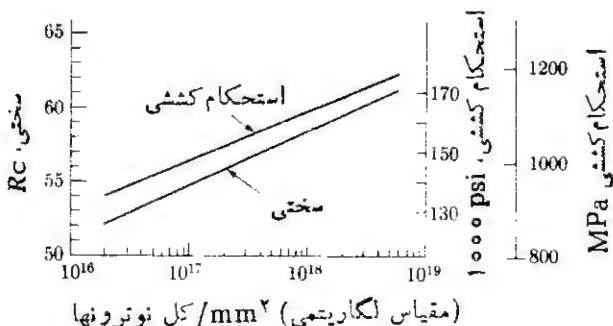
* گیراندازی نوترون موجب به وجود آمدن تغییر ایزوتوپی در اتم دریافت کننده می شود. مثلاً وقتی هسته منیزیم با ۳۰ نوترون و ۲۵ پروتون، نوترونی می گیرد، ۳۱ نوترون و ۲۵ پروتون خواهد داشت. این ایزوتوپ مخصوص منگن ناپایدار است (نیمه عمر = ۲۲۵۹ ساعت) و دیر یا زود الکترونی (اشعه β) از نوترون هسته از دست می دهد و آهن به وجود می آورد که حاوی ۳۰ نوترون و ۲۶ پروتون است: $n \rightarrow p^+ + e^-$.



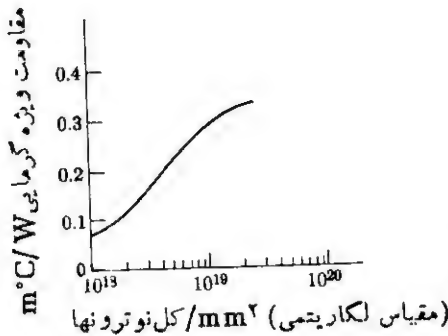
شکل ۶-۹-۲ زیانهای تابش روی فولاد (ASTM A-۲۱۲-B) فولاد کربنی سیلیسیم دار).

تغییر مکان اتم عیوب و اعوجاجی در ساختار جامد به وجود می آورد. تغییرات حاصل در خواص شبیه به تغییرات ناشی از سردکاری و کرنش سختی است. شکل ۶-۹-۲ اثر تشعشع نوترون را روی خواص مکانیکی فولاد کربنی سیلیسیم دار نشان می دهد. تغییر هر یک از خواص به این علت است که سهولت لغزش در شبکه اعوجاج یافته، کاهش می یابد.

در نظر اول استفاده از تشعشع به عنوان روش سخت کردن و استحکام دادن به فلز به نظر جالب می آید. ولی معایب ذاتی بسیاری دارد. اولاً همان طور که شکل ۶-۹-۳ برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ نشان می دهد، اثر تشعشع تابعی است لگاریتمی از میزانی که فلز



شکل ۶-۹-۳ سخت کردن تشعشعی (فولاد زنگ نزن نوع ۳۰۴). نوترونها آنها را از محل خود می رانند و بنابراین لغزش را در فلز محدود می کنند. از آنجا که جریان نوترون در مقیاس لگاریتمی کشیده است، هر چرخه به تشعشع نسبتاً طولانیتری نیاز دارد.



شکل ۴-۹-۶ مقاومت ویژه بر حسب تشعشع نوترون (گرافیت به موازات جهت بلوری ترجیحی).

در معرض تشعشع قرار گرفته است. تشعشع لازم برای افزایش سختی به تدریج بیشتر می شود. ثانیاً گرفتن نوترون و فعال سازی اشعه گاما که به همراه تشعشع به وجود می آید، ممکن است از لحاظ رادیولوژیکی ماده «داغی» به وجود آورد.

مقاومت های ویژه گرمایی و الکتریکی با تابش نوترون افزایش می یابند. شکل ۴-۹-۶ اثر آن را روی مقاومت گرمایی نشان می دهد. افزایش هر دو مقاومت را می توان از اطلاعات مربوط به تغییر تحرک الکترون در جاهایی که در آنها اعوجاج ایجاد شده پیش بینی کرد (بخش ۵-۲).

از بین بردن زیانهای حاصل از تشعشع، زیانهای حاصل از تشعشع را می توان با تابکاری مناسب در دماهای بالا از بین برد. مکانیسم از بین بردن این اثرات شبیه به مکانیسم تبلور مجدد است (بخش ۶-۶). ولی دمای لازم معمولاً کمتر است. علت آن معلوم است زیرا یکبارگ اتمها به محلی که نسبت به محل معمول آنها در طول نابجایی انرژی بیشتری دارد تغییر مکان داده اند.

مرور و بررسی مطالب

فلزات رسانندگی الکتریکی و گرمایی بالایی دارند زیرا حاوی الکترونهای آزادند. همچنین معمولاً استحکام خوبی همراه با انعطاف پذیری زیاد دارند. این امر شکل دادن آنها و ساختن قطعات صنعتی و مصرفی را میسر می سازد. بنابراین در این فصل بر رفتار فلزات به عنوان تابعی از عناصر آلیاژی، تغییر شکل و دماهای بالا تأکید شد و توجه ما به فلزاتی که فقط یک فاز دارند محدود شد. مواد چندفاز را در فصول آینده بررسی خواهیم کرد.

خلاصه

آلیاژهای تک فاز از فلز خالص مستحکمترند. این خاصیت، محلول سختی نام دارد که یکی از دو وسیله اصلی برای بالا بردن استحکام مس و آلیاژهای آن است، همچنین برای افزایش

استحكام آلياژهای مقاوم در دمای بالا به کار می‌روند. علت محلول سختی آن است که اتمهای ناخالصی در طول صفحات لغزش مانع حرکت نابجاییها می‌شوند.

متغیرهای میکروساختارهای تك فاز شامل (۱) اندازه دانه (۲) شكل دانه؛ و (۳) جهتگیری دانه‌هاست. رشد دانه در تمام دماها صورت می‌گیرد ولی قبل از آنکه دما از نصف دمای ذوب بیشتر شود، فوق‌العاده آهسته است. در دماهای پایین، مرزدانه‌ها مانع تغییر شكل پلاستیکی می‌شوند؛ بنا بر این فولادهای ریزدانه پراستحکامتر از فولادهای درشت دانه‌اند. در دماهای بالا وضعیت عکس می‌شود زیرا حرکت اتمها در داخل فلز جامد آسانتر صورت می‌گیرد.

مدول برشی نسبت تنش برشی به کرنش برشی کشسان است. مدول کشیدگی فشار هیدرواستاتیکی را به تغییر حجم کشسان مربوط می‌کند. هر دو این مدولها را می‌توان از مدول پانگ (بخش ۱-۲) و نسبت پواسون به دست آورد. مدول کشسانی معمولا چندسواست. فلزات توسط برش تغییر شكل می‌یابند. بنا بر این آنچه که برای تغییر شكل پلاستیکی اهمیت دارد جزء تفكیک شده برشی تنشهای محوری است. تنش برشی بحرانی هریك از سیستمهای لغزشی تفاوت دارد.

کرنش سختی در نتیجه تغییر شكل پلاستیکی اولیه به وجود می‌آید. بنا بر این هر نوع فرایند شكل دادن سرد، خواص مکانیکی را تغییر می‌دهد. پس از محلول سختی، این دومین روش عمده برای بهبود خواص فلزات است. متأسفانه معمولا با افزایش سختی کاهشی در انعطاف پذیری نیز به وجود می‌آید. در دماهای بالا، نوآرایی اتمها می‌تواند رخ دهد و آثار سردکاری از بین برود و بسدین وسیله فلز نرمتر و انعطاف پذیری آن بیشتر شود. این روش را تابکاری و تبلور مجدد می‌نامیم زیرا بلورهای جدیدی تشکیل می‌شوند. اگر فرایندهای تغییر شكل در بالای دمای تبلور مجدد صورت گیرند، فرایندهای گرمکاری نامیده می‌شوند. در این دماهای بالا، فلز با همان سرعتی که تغییر شكل پیدا می‌کند تابکاری می‌شود؛ بنا بر این سخت شدن کرنشی در آن دیده نمی‌شود.

شرایط کاربرد فلزات ممکن است موجب خزش در دماهای بالا شود، یا در اثر بارگذاری چرخه‌ای خستگی به وجود آید. در صورتی که تغییر شكل پلاستیکی وجود نداشته باشد شکست ترد است. اگر شکست با صرف انرژی و تغییر شكل پلاستیکی همراه باشد انعطاف پذیر است. تابش نوترون موجب به وجود آمدن عیوب نقطه‌ای در مواد می‌شود و بنا بر این خواص را تغییر می‌دهد. ماده معمولاً سخت‌تر، پراستحکامتر و تردتر می‌شود. عوامل مختلف ذکر شده در این پاراگراف را باید برای تعیین فلزاتی که در موارد مختلف به کار می‌روند و ساختارهای مختلف، مدنظر قرار داد.

سؤالات تشریحی

۱. چرا نسبت ویدمان - فرانتس برای مواد غیر فلزی به کار نمی‌رود؟
۲. فرق بین شكل دانه و جهتگیری دانه را در مواد تك فاز بنویسید.

۳. چرا رسانندگی آلیاژ مس و نیکل از رسانندگی تگ تگ این فلزات کمتر است؟
۴. فرایندهای مسکانیکی شکل دادن شکل‌های ۲-۶ و ۲-۶ و ۳-۲ را باهم مقایسه کنید. کدامیک از آنها فلز را یکنواخت تر شکل می‌دهند؟ یکنواختی کدامیک کمتر است.
۵. فرق بین سه مدول کشسانی را ذکر کنید.
۶. معمولاً تنش استحکام تسلیم را پس از کرنش ۰.۲٪ افست در نظر می‌گیریم [شکل ۱-۲-۱ (ج)]. بر اساس شکل ۳-۳-۶ چرا این کار لازم است؟
۷. فرض کنید ماده‌ای در اثر کشش تغییر شکل کشسان می‌یابد بدون آنکه تغییری در حجم پیدا شود یعنی، $(1+e_x)(1+e_y)(1+e_z) = 1$. نسبت بواسون را حساب کنید.
۸. عناصر آلیاژی روی مدول کشسانی فقط کمی اثر می‌گذارند یا اصلاً اثر نمی‌گذارند. (به مس و برنج در پیوست (ج) رجوع کنید) ولی بر استحکام فلز اثر بسیاری دارند (شکل ۱-۶-۲). دلایل این اختلاف را شرح دهید.
۹. ترکیب زوایای λ و ϕ چه باشد (رابطه ۱-۲-۶) که تنش برشی تفکیک شده بیشترین مقدار را داشته باشد؟
۱۰. فرق بین تنش برشی تفکیک شده و تنش برشی بحرانی را بنویسید.
۱۱. آلیاژهای روی و منیزیم بیشتر به صورت ریخته شده استفاده می‌شوند تا به صورت کار شده (تغییر شکل پلاستیکی یافته). دلیل سوجوی ذکر کنید.
۱۲. چرا آلیاژهای مس و نیکل از تگ تگ این فلزات بر استحکام ترند؟
۱۳. اتم ناخالصی مانع حرکت نابجایی می‌شود. در این باره شرح دهید.
۱۴. میله‌ای از میان قالبی در حالت سرد کشیده می‌شود تا به دو برابر طول اولیه خود برسد. چرا انعطاف پذیری آن کاهش می‌یابد؟ چه مقدار سردکاری شده است؟ آیا درصد کاهش سطح مقطع آن افزایش یافته یا کم شده است؟ (این سؤال به منظور مرور تفاوت بین افزایش طول به عنوان فرایند و ازدیاد طول به عنوان یک خاصیت و بین کم شدن سطح مقطع حاصل از کار سرد و کاهش سطح مقطع به عنوان یک خاصیت طرح شده است.)
۱۵. با استفاده از داده‌های شکل‌های ۱-۶-۲ (ب)، ۶-۵-۶ و ۷-۵-۶، منحنی احتمالی استحکام تسلیم بر حسب کار سرد را برای برنج ۷۰-۳۰ رسم کنید.
۱۶. چگونه زمان طولانیتر (بیشتر از یک ساعت) روی منحنی‌های شکل ۶-۶-۴ اثر می‌گذارد؟ تفاوت این منحنیها با منحنی‌های مربوط به برنج ۱۵-۸۵ چیست؟
۱۷. ممکن است به عنوان قانون کلی دمای تبلور مجدد را نصف دمای ذوب در نظر بگیریم. چرا این قانون باید با احتیاط به کار گرفته شود.
۱۸. فرق بین سردکاری و گرمکاری قلع را بنویسید. برای تنگستن نیز تفاوت را ذکر کنید.
۱۹. اساس مراحل مختلف خزش را که در شکل ۶-۷-۹ دیده می‌شود، شرح دهید.
۲۰. چگونه این حقیقت که وقتی اتم با دانه‌ای که سطح محدب دارد همسایه شود انرژی کمتری دارد، موجب حرکت مرز دانه می‌شود.

۲۱. شرح دهید که چرا فلز Ti بلور نرمتر و در نتیجه پلاستیکی تر از فلز چند بلوری است.

۲۲. در دماهای بالاتر، دانه‌ها اندازه متوسط خود را افزایش می‌دهند. چرا در دماهای پایینتر اندازه آنها کم نمی‌شود؟

۲۳. چرا مواد درشت دانه در دمای بالا نسبت به مواد ریزدانه استحکام بیشتری دارند؟
 □ ۲۴. اگر سایر موارد یکسان باشد کدامیک سرعت خزش کمتری دارد: الف) فولادی که در تنش کششی بالا و دمای پایین مورد استفاده قرار گرفته است؛ ب) فولادی که در تنش کششی پایین و دمای بالا به کار رفته است؛ ج) فولادی که در تنش کششی پایین و دمای پایین استفاده شده است؟ چرا؟

□ ۲۵. مثالهایی ذکر کنید در مورد اینکه در کجا از شکست انعطاف پذیر می‌توان در طراحی که «خطر شکست در آن وجود نداشته باشد»، استفاده کرد.

□ ۲۶. در طراحی کششهایی که با پیچ و مهره ساخته می‌شوند در مقایسه با طراحی کششهایی که با جوشکاری ساخته می‌شوند به دمای انتقال اهمیت کمتری داده می‌شود. چرا؟

مسائل

۱-۱-۶ بر اساس شکل ۱-۶-۲، مقاومت الکتریکی برنج ۳۵-۷۰ تا بکاری شده چقدر است؟

جواب: $0.00062 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (یا $0.00062 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$)

۱-۱-۶ با مراجعه به شکل ۱-۶-۲، آیا از همان نسبت $W-F$ می‌توان برای برنج نیز مانند فلزات خالص استفاده کرد؟

۱-۱-۶ اگر مانند مثال ۱-۶-۲، نسبت $W-F$ متناسب با دما باشد، رسانندگی گرمایی مس را در 90°C تخمین بزنید.

جواب: $400 \text{ (W/m}^2\text{)} / (^\circ\text{C/m)}$ (یا $400 \text{ (W/mm}^2\text{)} / (^\circ\text{C/mm)}$)

۱-۱-۶ سیم مسی دارای مقاومت $0.5 \text{ } \Omega$ در هر 100 متر است. استفاده از سیم برنجی ۲۵-۷۵ به جای مس مورد توجه قرار گرفته است. اگر سیم برنجی همان اندازه را داشته باشد، مقاومت آن چقدر است؟

۱-۱-۵ آلیاژ برنج درموردی به کار رفته است که استحکام کششی بیش از 275 MPa و مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از $0.00062 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (مقاومت ویژه مس برابر است با $0.00017 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$) است. برنج چند درصد روی می‌تواند داشته باشد؟

جواب: ۱۵ تا ۲۳٪ روی

۱-۱-۶ آلیاژی از مس (برنج، یا Cu-Ni) مورد نیاز است که استحکام کششی آن حداقل

۲۴۵ MPa و مقاومت ویژه آن کمتر از $9 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ (الف) آلیاژ مناسب را با در نظر گرفتن اینکه $Zn > Cu > Ni$ قیمت است، انتخاب کنید؛ (ب) انعطاف پذیری آلیاژی که انتخاب کرده اید چقدر است؟

۶-۱-۶ برای کاربرد معینی به فلزی نیاز داریم که استحکام تسلیم آن بیشتر از ۱۰۰ MPa و رسانندگی گرمایی آن بیشتر از $(W/mm^2)/(^{\circ}C/mm)$ ۴۰۰ باشد. برنج تابکاری شده یا آلیاژ Cu-Ni تابکاری شده‌ای را معین کنید که بتواند در این مورد استفاده شود. جواب: از ۸۰ Cu-۲۰ Ni استفاده کنید.

۶-۱-۸ قایقی موتوری نیاز به محل نشستن دارد. از آهن نمی‌توان استفاده کرد زیرا زنگ می‌زند. مناسبترین آلیاژ را با استفاده از شکل‌های ۶-۱-۶ و ۶-۱-۳ انتخاب کنید. ماده مورد لزوم باید دارای استحکام کششی حداقل ۳۱۰ MPa؛ انعطاف پذیری حداقل ۴۵٪ از دیاد طول (در ۵۰ mm)؛ و قیمت کم باشد. (یادآوری می‌شود که روی از مس ارزانتر است.)

۶-۱-۹ سیمی برنجی باید بار ۴۵ N را بدون تسلیم شدن تحمل کند و مقاومتی کمتر از $33 \times 10^8 \Omega/m$ (الف) داشته باشد. الف) اگر سیم از برنج ۴۰-۶۰ ساخته شده باشد کوچکترین سیمی که می‌تواند به کار رود کدام است؟ (ب) در صورتی که از برنج ۲۰-۸۰ باشد چطور؟ برای ۱۰۰ Cu کدام است؟

جواب: الف) قطر ۱۰۸ mm؛ ب) قطر ۱۰۴ mm؛ ج) قطر ۱۰۲ mm.

۶-۲-۶ دو میله آلومینیومی به طول ۲۰ m هر کدام ۱۴۰۰ mm قطر دارد. یکی از میله‌ها از میان قالب ۱۲۷ mm کشیده شده است. الف) ابعاد جدید آن میله چقدر است؟ (ب) فرض کنید از هر میله نمونه‌های آزمایشی مشابهی ساخته شده (تغییر شکل یافته و نیافته) و روی آنها سنج طوسی به اندازه ۵۰ mm علامتگذاری شده است. کدامیک از میله‌ها انعطاف پذیری بیشتری دارد؟ کدامیک استحکام بیشتری دارد؟

جواب: الف) ۲۴۳ m؛ ب) بخش ۲-۱ را مرور کنید.

۶-۲-۶ میزان کربن فولاد مذابی به وزن ۲۲۵۰۰۰ kg باید با اکسید کردن آن و تولید CO از ۳ w/o به ۲۵ w/o کاهش یابد. هر مول گاز تحت شرایط استاندارد $22.4 \times 10^3 m^3$ را اشغال می‌کند. از فرایند تصفیه چه مقدار گاز حاصل می‌شود؟

۶-۳-۶ تغییر حجم میله‌ای برنجی را وقتی که توسط نیروی ۲۳۳ MPa در جهت محوری بارگذاری می‌شود حساب کنید. استحکام تسلیم آن ۲۷۰ MPa و نسبت پواسون آن ۰.۳۰ است.

جواب: ۰.۰۸۵ v/o

۶-۳-۶ مدول کشیدگی برنج در مسئله قبل چقدر است؟

۶-۳-۳ میل‌های به قطر 12.83 mm باسنجه طول 50 mm تحت بار 156 kN قرار گرفته و در حد کشان 356 mm کشیده شده است. قطر آن تحت بار، 12.80 mm است. الف) مدول کشیدگی میل چقدر است؟ ب) مدول برشی آن چقدر است؟

جواب: الف) تقریباً $105 \times 10^3 \text{ MPa}$ ؛ ب) $65 \times 10^3 \text{ MPa}$.

۶-۳-۴ مسی که مدول کشسانی 110000 MPa و نسبت پواسون 0.3 دارد تحت فشار هیدروستاتیکی 83 MPa قرار گرفته است. ابعاد سلول واحد آن چقدر است؟

۶-۳-۵ اگر تنش محوری مس 97 MPa باشد، بالاترین تنش نقطه‌ای در میل مسی چند بلوری چقدر است؟

جواب: 170 MPa

۶-۳-۶ مکعبی از آلایاژ آلومینیم که به دقت سنگ‌زده شده است $(100 \text{ mm})^3$ ، در جهت x تحت فشار بار 70 MPa قرار می‌گیرد. الف) اگر نسبت پواسون 0.3 باشد ابعاد جدید آن چقدر است؟ ب) بار فشاری ثانویه‌ای به اندازه 70 MPa در جهت y به همراه اولی اعمال می‌شود. در این صورت ابعاد چقدر است؟ ج) رابطه $(6-3-6)$ را به دست آورید. (توجه: مکعب را تحت تنش $P_h = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ در نظر بگیرید و به یاد داشته باشید که $(1 + \Delta V/V) = (1 + \Delta l/l)^3 = 1 + 3e + \dots$).

۶-۳-۷ اگر آهن به وسیله بار هیدروستاتیکی 205 MPa تحت فشار قرار گیرد، حجم آن به اندازه 0.13% تغییر می‌کند. اگر تحت تنش محوری 415 MPa قرار گیرد تغییر حجم آن چقدر خواهد بود؟

جواب: 0.09%

۶-۴-۱ نیروی 660 N در جهت $[111]$ بلور مکعبی اعمال می‌شود. نیروی تفکیک شده در جهت $[110]$ چقدر است؟

جواب: 540 N

۶-۴-۲ چه نیرویی باید در جهت $[112]$ به مس وارد شود تا نیروی تفکیک شده آن در جهت $[110]$ ، 410 N شود؟

۶-۴-۳ نیرویی برابر 3800 N در جهت $[111]$ به قلع وارد آمده است نیروی تفکیک شده آن در جهت $[110]$ چقدر است؟ (قلع bcc است و در آن $a = 0.356 \text{ nm}$ و $c = 0.356 \text{ nm}$).

جواب: 3550 N

۶-۴-۴ تنش محوری 123 MPa در جهت $[110]$ آهن bcc وجود دارد. تنش برشی

تفکیک شده آن در جهت [۱۰۱] روی صفحه (۰۱۰) چقدر است؟

جواب: 43.5 MPa

۶-۵ بلور آلومینیم روی صفحه (۱۱۱) و در جهت [۱۱۰]، با 35 MPa تنش اعمال شده در جهت [۱۱۱] می لغزد. تنش برشی تفکیک شده بحرانی چقدر است؟

جواب: 95 MPa

۷-۴ تک بلوری کاملاً در عرض سیم مسی (به قطر 10 mm) کشیده شده‌ای قرار دارد. بار کششی، برابر 1 kg ، در جهت طولی سیم و بسیار نزدیک به جهت [۱۰۱] اعمال شده است. الف) تنش محوری روی صفحه‌ای که به طور مستقیم از عرض سیم مسی گذرد چقدر است؟ ب) تنش برشی در جهت [۱۱۰] روی صفحه (۱۱۱) چقدر است؟

۷-۴ بامراجعه به مثال ۳-۷-۳، الف) اگر روی صفحات {۱۰۰} سرب، $10^{12} \times 8.2 \text{ atm}$ در هر میلی متر مربع وجود داشته باشد، صفحات مجاور چقدر باهم فاصله دارند؟ ب) اگر روی صفحات {۱۱۱} سرب $10^{12} \times 9.4 \text{ atm}$ در هر میلی متر مربع وجود داشته باشد، صفحات مجاور چقدر باهم فاصله دارند؟ بدون در نظر گرفتن شکل هندسی سلول واحد و از طریق اتم بر میلی متر مربع مسئله را حل کنید. ج) درجه مجموعه‌ای، انتظار می رود لغزش ساده تر صورت گیرد؟

جواب: الف) 5.0248 nm ؛ ب) 0.0285 nm

۸-۴ دوازده سیستم لغزش {۱۰۱} {۱۱۱} در فلز bcc کدام است؟ دوازده سیستم لغزش {۲۱۱} {۱۱۱} کدام است؟

۹-۴ □ بامراجعه به شکل ۶-۴-۸، کوتاهترین بردار لغزشی روی صفحه {۱۱۱}، b_{111} (یا جایگشت‌های آن) است. دومین بردار از نظر کوتاهی $b_{11\bar{1}}$ (یا جایگشت‌های آن) است. الف) بدون در نظر گرفتن جهات این بردارهای لغزش کدام جهت شامل کوتاهترین بردار لغزش بعدی است؟ ب) انرژی نسبی لازم برای آن چگونه با b_{111} مقایسه می شود؟

جواب: الف) $b_{\bar{1}\bar{1}1}$ ؛ ب) $\times 7$

۱۰-۴ اگر دو طرف صفحه تختی از برنج اختلاف دمایی برابر 125°C داشته باشد، باید بیشتر از $27 \text{ cal/mm}^2 \cdot \text{sec}$ (یا 113 W/mm^2) را هدایت کند. همچنین باید حاصلضرب استحکام کششی در ضخامت آن بیشتر از 55 MPa (m) باشد یعنی $(S_T)(t) > 55 \text{ MPa (m)}$. برنجهای ۱۰-۹۰، ۲۰-۸۰، و ۳۰-۷۰ در شکل ۶-۱ را در نظر بگیرید و آلیاژی را که با کمترین قیمت، نیازهای موجود را برآورده می کند انتخاب کنید.

۶-۵-۱ چه مقدار کار سرد روی میله آلومینیومی در مسئله ۶-۲-۱ اعمال شده است؟

جواب: ۱۸%

۶-۵-۲ فلز موجود در مسئله ۶-۲-۱ را از آلومینیم به مس تبدیل کنید. استحکام کششی و انعطاف پذیری فلز تغییر شکل یافته چقدر است؟

۶-۵-۳ سیمی مسی به قطر ۲۵ mm قبل از کشیدن در حالت سرد از میان قالبی به قطر ۲۵ mm تابکاری شده است. استحکام کششی سیم پس از کشیدن در حالت سرد چقدر است؟

جواب: ۳۳۰ MPa

۶-۵-۴ ورقه‌ای از آهن خالص به ضخامت ۲۵ mm قبل از نورد سرد، تابکاری شده است. این ورق تا ۲۵ mm ضخامت نورد شده و تغییر عرض آن قابل اغماض است. انعطاف پذیری آهن پس از نورد سرد چقدر خواهد بود؟

۶-۵-۵ فلز مسئله ۶-۲-۱ را با $80\text{ Cu}-20\text{ Zn}$ عوض کنید. انعطاف پذیری دو میله چقدر است؟

جواب: تابکاری شده - ۵۰% ازدیاد طول؛ ۱۸% کار سرد - ۲۰% ازدیاد طول.

۶-۵-۶ مسی به صورت سیمی با حداقل ۳۱۰ MPa استحکام کششی و حداقل ۱۸% ازدیاد طول (۵۰ mm) به کار رفته است. چه مقدار کار سرد روی مس انجام شده است؟

۶-۵-۷ آهنی باید دارای سختی برینل حداقل ۱۲۵ و ازدیاد طول حداقل ۳۲% (۵۰ mm) شود. چه مقدار کار سرد روی آهن لازم است؟

جواب: از ۲۵% کار سرد استفاده کنید.

۶-۵-۸ الف) چه مقدار روی باید در پرنج سرد کاری شده وجود داشته باشد تا انعطاف پذیری آن به حداقل ۲۰% ازدیاد طول و سختی آن حداقل به $R_B 70$ برسد؟
ب) چه مقدار باید سرد کاری شود؟ (جواب نباید از ۳۶% روی بیشتر باشد زیرا فرایند آن پیچیده می‌شود.)

۶-۶-۱ سیمی مسی باید قطری برابر ۷ mm داشته باشد و استحکام کششی آن ۳۴۵ MPa باشد. این سیم از میله‌ای مسی به قطر ۱۰ mm ساخته می‌شود. قبل از سرد کاری نهایی قطر میله برای تابکاری چقدر باید باشد؟

جواب: ۹.۵ mm

۶-۶-۲ میل گردی از آلیاژ $85\text{ Cu}-15\text{ Zn}$ به قطر ۵ mm در حالت سرد به قطر ۱۲.۵ mm رسانده شده است. اگر بخواهیم استحکام کششی نهایی ۴۱۵ MPa (یا بیشتر) به همراه انعطاف پذیری نهایی با حداقل ۱۰% ازدیاد طول (در سنجه طول ۵۰ mm)

به دست آید، چه روشی را پیشنهاد می کنید؟

۴-۳-۳ سیمی از برنج ۷۰-۳۰ (شکل ۶-۵-۶) با استحکام کششی بیش از ۴۱۵ MPa، سختی کمتر از $R_B 75$ ، و ازدیاد طول (۵۰ mm) بیش از ۲۵٪ توسط کشیدن در حالت سرد ساخته می شود. قطر اولیه ۲۰۵ mm است. قطر محصول نهایی باید ۱۰۰ mm باشد. روش به دست آوردن این مشخصات را توضیح دهید.

جواب: ۱۵٪ تا ۱۹٪ کار سرد؛ بنابراین باید هنگامی که قطر آن ۱۰۱ mm است قبل از ۱۷٪ کار سرد نهایی، تابکاری شود.

۴-۳-۴ میل گزردی برنجی (۱۵ Zn و ۸۵ Cu)، به قطر ۵ mm باید در حالت سرد کشیده شود تا سیمی به قطر ۲۰۵ mm به دست آید. در صورتی که بخواهیم سختی سیم $R_B 72$ ، استحکام کششی بیشتر از ۴۱۵ MPa و انعطاف پذیری بیشتر از ۱۰٪ ازدیاد طول در سنجه طول استاندارد باشد، روشی را برای فرایند کشش مشخص کنید.

۴-۳-۵ ورق نسرد شده ای از برنج ۳۴ Zn-۶۶ Cu به ضخامت ۱۲۷ mm هنگام دریافت از تولید کننده دارای انعطاف پذیری برابر ۲٪ ازدیاد طول (در سنجه طول) است. این ورق را می خواهیم پس از نورد به ضخامت ۳۰۲ mm برسانیم. در این شکل نهایی، استحکام کششی فلز باید حداقل ۴۸۳ MPa، و انعطاف پذیری آن حداقل ۷٪ ازدیاد طول (در سنجه طول) باشد. فرض کنید فرایند نوردی که ضخامت ورق را کاهش می دهد عرض را تغییر ندهد. تمام مراحل لازم را (با ذکر دما، زمان، ضخامت و...) مشخص کنید.

۴-۳-۶ ورقی آلومینیومی توسط ورقکاری چرخشی به صورت قالب کیکی تغییر شکل داده است (شکل ۶-۲-۳). فرض کنید داده های شکل ۶-۳-۳ در مورد این آلومینیوم سردکاری شده نیز صحت دارد. آیا در فر 180°C (350°F) که برای پخت کیک به کار می رود این آلومینیوم شروع به تبلور مجدد می کند؟ این مسئله را هم با استفاده از شکل و هم به صورت کیفی حل کنید.

۴-۳-۷ فرض کنید تابکاری در یک ثانیه کامل شود تا امکان گرمکاری آلومینیوم شکل ۶-۳-۳ و مثال ۶-۳-۲ وجود داشته باشد. چه دمایی لازم است؟

جواب: ۶۸۵ K (یا 412°C)

۴-۳-۸ داده های زیر از آزمایش شکست ناشی از خزش در فلز اینکونل «X» در 815°C (1500°F) به دست آمده است: الف) ۱٪ کرنش پس از ۱۰ ساعت؛ ب) ۲٪ کرنش پس از ۲۰۰ ساعت؛ ج) ۴٪ کرنش پس از ۲۰۰۰ ساعت؛ د) ۶٪ کرنش پس از ۴۰۰۰ ساعت؛ ه) گلوبی پس از ۵۰۰۰ ساعت به وجود می آید و فلز پس از ۵۵۰۰ ساعت می شکند. سرعت خزش چقدر بوده است؟

جواب: ۰۰۵۰۱٪ در ساعت

□ ۶-۶-۶ برای طراحی يك لوله تحت فشار باید تحمل کرنش $31/0$ در مدت يك سال در نظر گرفته شود. بیشینه سرعت خزش را بر حسب ارقام درصد در ساعت معین کنید.

□ ۱-۸-۶ گاهی فرض می‌شود که اگر در آزمایش خستگی پس از 10^8 چرخه شکست به وجود نیاید، تنش زیر حد دوام است. دستگاهی که برای آزمایش به کار رفته مستقیماً به موتور الکتریکی با 1740 دور در دقیقه متصل شده است، چه مدتی طول می‌کشد تا این تعداد چرخه اعمال شود؟

جواب: ۴۵ روز

□ ۶-۸-۶ میل لنگ اتومبیلی را آزمایش کنید. جنبه‌های مختلف طراحی را که تغییر دهنده مقاومت در برابر خستگی اند، ذکر کنید.



فازهای مولکولی

چشم انداز فصل

«پلاستیکها» از نظر فنی به سرعت اهمیت یافته‌اند. سبک‌وزنی، بزرگترین مزیت آنهاست؛ و نیز به راحتی و با کمترین زحمت به شکل‌های هندسی پیچیده در می‌آیند و خواص مطلوب از خود نشان می‌دهند. پلاستیکها را می‌توان در ردهٔ موادی که با سرعت، سرسام‌آوری کاربرد صنعتی یافته‌اند، به‌شمار آورد. چون به آسانی تولید می‌شوند، طراحان اغلب بدون اطلاع کافی از مشخصات و محدودیتهای مصرفشان از آنها استفاده می‌کنند. هدف این فصل بررسی ساختار این مواد غیرفلزی و ارتباط دادن این ساختارها به خواص و رفتارشان در هنگام کار است.

نام صنعتی «پلاستیکها»، پلی‌مر است، که شامل مولکولهای بزرگ یا ماکرو-مولکول‌اند و هر مولکول از تعدادی واحد تکراری یا مرکز تشکیل شده است. در این فصل مرها را مطالعه می‌کنیم و چگونگی ترکیب آنها و تولید مواد پلی‌مری را بررسی خواهیم کرد. برای این کار نخست، به آرایشهای مولکولی ایدئال نظری می‌افکنیم و بعد همان‌طور که در مورد بلورها مطرح کردیم بی‌نظمیها را که اثر

قابل ملاحظه‌ای روی رفتار پلی‌مر دارند بررسی خواهیم کرد. پلی‌مرها به آسانی متبلور نمی‌شوند، زیرا به جای اتمهای تنها، مولکولهای بزرگ باید به صورت یک ساختار منظم آرایش یابند. به علاوه مولکولها پیوندهای بین مولکولی نسبتاً ضعیفی دارند. همچنین مواد پلی‌میری چون الکترون آزاد ندارند عایق‌اند.

با توجه به عواملی که در پاراگراف قبل متذکر شدیم نتیجه می‌گیریم که خواص و رفتار پلاستیکها از جنبه‌های بسیاری با فلزات تفاوت دارد.

هدف از مطالعه

۱. آشناسدن با مولکولها که مقدمه‌ای است برای آشنایی با پلی‌مرها.
۲. محاسبه اندازه مولکولی، و تشریح تغییرات پیوندی در واکنشهای پلی‌مر شدن.
۳. آشناسدن با سیستمهای مولکولی که الف) روی ترتیب مولکولی و تبلور پلی‌مرهای خطی اثر می‌گذارند و ب) موجب بسط ساختارهای سه بعدی می‌شوند.
۴. تفسیر خواص ویسکوالاستیک و دی‌الکتریک بر حسب واکنشهای مولکولی، بالا و زیر دمای شیشه‌ای.
۵. پیشبینی از هم پاشیدگی، که ممکن است در بعضی محیطهایی که در عمل در آن قرار می‌گیرند رخ دهد.
۶. توانایی طراحی محصولات در دروسهای آینده دانشگاهی، یا در شغل آینده خود، و ابلاغ هوشیارانه مشخصات مهندسی مورد نظر خود به مهندس طراح تا او مواد بهینه را برگزیند.

۷-۱ مولکولهای بزرگ

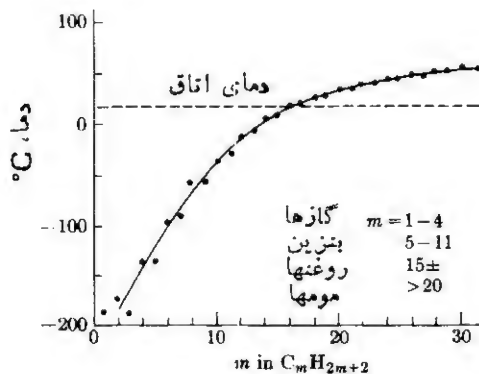
پس از فلزات دسته دیگری از مواد را بررسی می‌کنیم که جامدات مولکولی نام دارند. این ترکیبات غیرفلزی‌اند (بخش ۷-۲) و معمولاً از مواد آلی خالص سرچشمه می‌گیرند. مواد آلی از نخستین موادی‌اند که در مهندسی به کار می‌رفته‌اند. استفاده از چوب به عنوان ماده ساختمانی، و سایر مواد طبیعی آلی مانند چرم برای واشر، نمد برای آب‌بندی، چوب‌پنبه برای عایقکاری، الیاف برای اتصال، روغن برای روغنکاری، و رزین‌ها به عنوان روکش محافظ رواج زیادی دارد.

از نخستین روزهایی که مواد آلی به کار رفته‌اند برای بهبود خواص مهندسی آنها کوشش شده است. مثلاً خواص چوب در جهات مختلف فرق می‌کند و استحکام آن به موازات دانه‌ها چند برابر بیشتر از جهت عمود بر آنهاست. برای رفع این نایکخواهی چوب چندلا به وجود آمده است و اگر منافذ چوب را با زرین گرما سخت پر کنند خواص فیزیکی بهتری به دست خواهد آمد.

قوة ابتکار تکنولوژیست‌ها در کار با مواد آلی، به بهبود مواد آلی طبیعی محدود نشده است بلکه اجسام مصنوعی بسیاری نیز به وجود آمده است. مثلاً پلاستیکها یا به بیان دقیقتر پلی‌رها* انواع بسیار زیادتری از مواد را برای کاربردهای مهندسی ارائه کرده‌اند. برای گسترش کاربرد چنین موادی گامهای بزرگی برداشته شده و تلاش روزافزونی در جریان است.

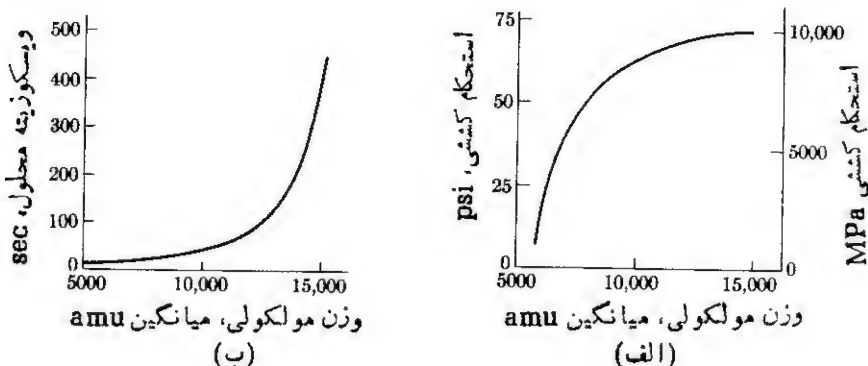
مهندسی که با پلی‌رها سروکار دارد چه با مواد آلی طبیعی کار کند و چه با مواد آلی مصنوعی، ابتدا لازم است ماهیت و مشخصات مولکولهای بزرگ را بشناسند. در مواد طبیعی مولکولهای بزرگ را طبیعت «می‌سازد»؛ در مواد مصنوعی این ماکرومولکولها توسط اتصال عمده، مولکولهای کوچک به وجود می‌آیند.

اندازه مولکولی. قبلاً در شیمی دیده‌ایم که نقطه ذوب تمام هیدروکربنهای C_mH_{2m+2} به اندازه مولکول آنها بستگی دارد (شکل ۱-۷-۱). به‌طور کلی پلی‌مرهایی که از مولکولهای بزرگ ساخته شده‌اند محکمتر و در برابر تنشهای مکانیکی و گرمایی از



شکل ۱-۷-۱ نقطه ذوب هیدروکربنهای سری C_mH_{2m+2} برحسب اندازه مولکول آنها.

* لغت «پلاستیک» در حقیقت «صفت» است و شکلپذیر بودن دائمی ماده را بیان می‌کند. اما در اصطلاح متداول، پلاستیکها موادی آلی هستند که با تغییر شکل پلاستیکی تولید شده‌اند.



شکل ۷-۱-۲ خواص پلی-مر بر حسب اندازه آن. (کوبلی مروینیل کلرید و وینیل استات).
الف) استحکام کششی، ب) ویسکوزیته.

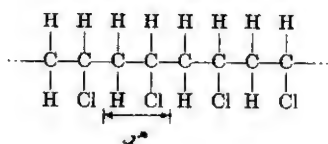
پلاستیکهایی که مولکولهای کوچک دارند مقاومترند (شکل ۷-۱-۲). نظیر این نوع رابطه بین اندازه مولکولی و خواص، راهم در پلی‌مرهای مصنوعی مانند پلی‌وینیل کلرید، نایلون، ساران، و هم در مواد آلی طبیعی مانند سلولز، لاستیک، موم، و لاک می‌توان یافت. این مواد آلی در رده پلی‌مرها قرار می‌گیرند زیرا مولکولهایی شامل چندین جزء یا واحد تکراری به نام هر هستند. بنا براین برای این مسود مولکولی واژه فیتیر پلی‌مر را به کار خواهیم برد تا مواد را بتوان از نحوه تغییر شکل آنها تشخیص داد.

بیشتر مولکولهای بزرگی که درباره آنها بحث خواهیم کرد واحدهای تکراری کوچکتری به نام هر دارند (شکل ۷-۱-۳). بنا براین، جرم مولکول بزرگ یعنی پلی‌مر، حاصل ضرب جرم هر در تعداد مرهای مولکول است. مثلاً اگر مولکول پلی‌وینیل کلرید ۵۵۰ مروینیل کلرید، C_2H_3Cl داشته باشد. هر یک از آنها

$$2(12 \text{ amu}) + 3(1 \text{ amu}) + 35.5 \text{ amu} = 62.5 \text{ amu}$$

دارد، کل جرم مولکول پلی‌مر $(62.5 \text{ amu}) \times 500$ یا 31250 amu (یا 31250 گرم بر مول) است.

علاوه بر نشان دادن اندازه مولکول توسط جرم آن، معمولاً از درجه پلی‌مر شدن، n ، صحبت به میان می‌آید که تعداد مرها در هر مولکول است.



شکل ۷-۱-۳ مولکول پلی‌مری (پلی‌وینیل کلرید). مولکول بزرگ از تعداد زیادی واحدهای تکراری (مرها) تشکیل شده است $(C_2H_3Cl)_n$ (به شکل ۷-۱-۳ رجوع کنید).

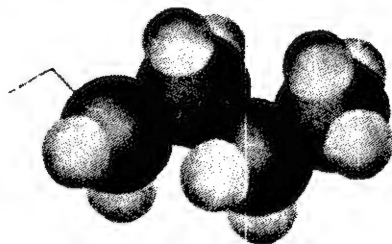
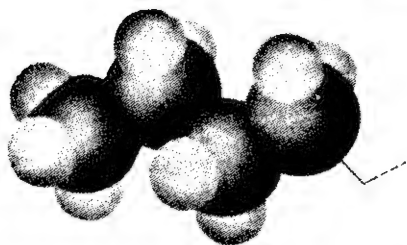
$$n = \frac{\text{جرم مولکولی}}{\text{جرم مر}} \quad (۱-۱-۷)$$

و واحد آن به صورت زیر بیان می شود (amu = واحد جرم اتمی)

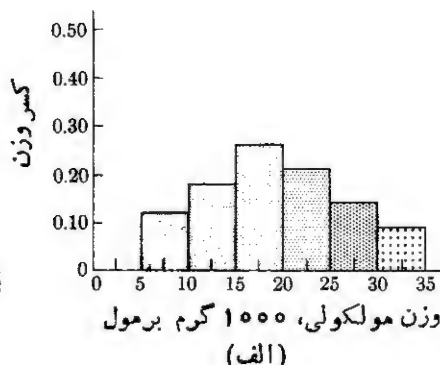
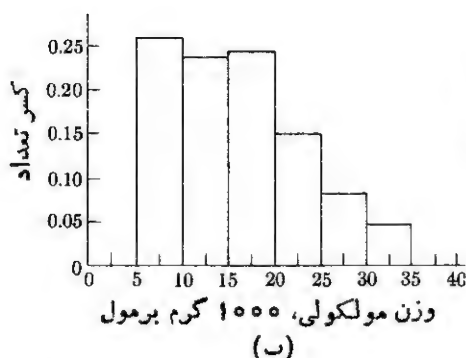
$$\frac{\text{amu/مولکول}}{\text{amu/مر}} = \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

مولکولی را که هم اکنون شرح دادیم و دارای جرم ۳۱۲۵۰ amu و درجه پلی مر شدن ۵۰۰ بود، در گستره پلی مرهای تجاری که معمولاً بین ۷۵ تا ۱۰۰۰۰ مر دارند، قرار می گیرد. این مقادیر چندین مرتبه از مقادیر مربوط به مولکولهای دیگر بزرگترند (شکل ۲-۳-۱). با این حال، گرچه جرم این مولکولها زیاد است ولی خود مولکول کوچکتر از آن است که میکروسکوپ نوری قدرت تشخیص آن را داشته باشد و فقط تحت شرایط معینی با میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده است. بنابراین تعیین اندازه مولکولی غالباً به طور غیرمستقیم و با وسایل اندازه گیری ویسکوزیته، فشار اسمزی، یا پراکندگی نور انجام می شود که تمام این کمیتهای به تعداد، اندازه، یا شکل مولکول در محلول یا تعلیق بستگی دارند [شکل ۲-۱-۷ (ب)].

توزیع اندازه مولکولی. در موادی مانند پلی اتیلن (شکل ۲-۱-۷) یا پلی وینیل کلراید که از اتصال مولکولهای کوچک به وجود می آیند، اندازه تمام مولکولهای بزرگ حاصل یکسان نیست. و همان طور که انتظار می رود بعضی از آنها بیش از سایرین رشد می کنند. در نتیجه اندازه مولکولی پلاستیکها گستره ای دارد که تا اندازه ای شبیه به مخلوط پروپان، هگزان، اکتان، و سایر هیدروکربنهای پارافینی در نفت خسام است. بنابراین برای تعیین یک شاخص اندازه یکتا باید میانگین درجه پلی مر شدن را محاسبه کرد. یکی از روشهای محاسبه میانگین وزن مولکولی [شکل ۲-۱-۷ (الف)] تعیین کسر وزنی مولکولهای موجود در هر یک از فواصل مختلف اندازه است.



شکل ۲-۱-۷ پلی مر خطی (پلی اتیلن). طول مولکول در مولکولهای مختلف متفاوت است، ولی همه آنها صداهای اتم کربن دارند.



شکل ۵-۱-۷ توزیع اندازه پلی-مر (الف) براساس جرم؛ (ب) براساس تعداد. این دو شکل برای یک ماده رسم شده‌اند. در (الف) داده‌ها نشان می‌دهد که ۱۲٪ کل جرم را مولکولهای بین ۵۰۰۰ amu و ۱۰۰۰۰ amu (مقدار متوسط = ۷۵۰۰ amu) تشکیل می‌دهند. سایر درصدهای کل جرم در فواصل دیگر قرار دارند. در (ب) می‌بینیم که ۲۶٪ از کل تعداد مولکولها در گستره ۵۰۰۰ amu تا ۱۰۰۰۰ amu هستند. این مقدار ۲۶٪ در (ب) با ۲۶٪ در (الف) اختلاف دارد زیرا مولکولهای کوچک بسیاری در ۱۲٪ جرم وجود دارد. در عوض ۴٪ مولکولها در ۹٪ جرم در فاصله ۳۵۰۰۰-۳۰۰۰۰ قرار می‌گیرند. (مثال ۷-۱-۳ را ببینید).

«میانگین جرمی» اندازه مولکولی، \bar{M}_m به این ترتیب محاسبه می‌شود

$$\bar{M}_m = \sum (W_i M_i) \quad * (۲-۱-۷)$$

که در آن W_i کسر جرمی در هر یک از اندازه‌ها و M_i مقدار (میانۀ) آنها در آن فاصله است. «میانگین جرمی» اندازه مولکولی بخصوص در بررسی خواصی چون ویسکوزیته اهمیت دارد که در آن جرم یکایک مولکولها مهم است.

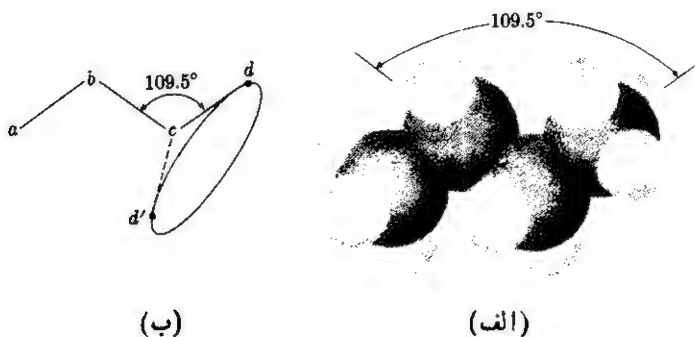
روش دیگر تعیین میانگین اندازه مولکولی استفاده از کسر تعداد مولکولهای موجود در هر یک از فواصل مختلف اندازه [شکل ۵-۱-۷ (ب)] است. خواصی مانند استحکام [شکل ۲-۱-۷ (الف)] نسبت به تعداد مولکولهای بزرگ حساستر از جرم واقعی‌اند. بنابراین اندازه مولکولی «میانگین تعداد» \bar{M}_n اهمیت بسیار دارد

$$\bar{M}_n = \sum (X_i M_i) \quad * (۳-۱-۷)$$

* روابط (۲-۱-۷) و (۳-۱-۷) حالت‌های ویژه رابطه ریاضی میانگین است
 (مقدار) $(\text{کسر}_i) = \sum (\text{میانگین})$

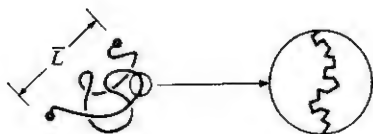
در این رابطه X_i کسر تعداد مولکولها در هر فاصله‌ای از اندازه است [شکل ۷-۱-۵ (ب)]. همان‌طور که قبلاً دیدیم M_i مقدار (میانۀ) هر فاصله‌اندازه است. (مثال ۷-۱-۳ را ببینید.)

طول مولکولی. با استفاده از جدول ۲-۳-۱ می‌توان محاسبه کرد که طول متوسط مولکول پلی‌وینیل کلرید با درجه پلی‌مرشدن ۳۵۷ مر (مثال ۷-۱-۳) ۹۵ nm است. زیرا هر پیوند C-C برابر با ۱۵۴ nm است و دو برابر تعداد مرها پیوند وجود دارد ولی این محاسبه به تصحیح نیاز دارد، زیرا شکل ۷-۱-۳. فوق‌العاده ساده شده است. زاویه پیوند C-C-C ۱۰۸° نیست و برابر با ۱۰۹.۵° است (شکل ۷-۱-۴). به این ترتیب طول مسیر «دندان‌اره‌ای» برابر با $54.7^\circ \sin(95 \text{ nm})$ یا ۷۷ nm خواهد بود. مهمتر اینکه پیوندهای یگانه در زنجیر کربن، آزادی چرخش دارند (شکل ۷-۱-۶)، به‌طوری که اگر فقط سه پیوند را در نظر بگیریم طول دو انتهای آنها از کمتر از ۳ nm، $a-d'$ تا ۲ nm، $a-d$ ، متغیر است. همان‌طور که آشفته‌گی گرمایی زاویه‌های پیوند را می‌چرخاند، طول به‌طور تصادفی بین این دو حد تغییر می‌کند. در نتیجه مولکول فوق با ۳۵۷ مر، اگر شبیه شکل ۷-۱-۴ باشد می‌تواند طولی برابر ۷۷ nm داشته باشد، یا اگر دو انتهای مولکول مجاور هم قرار گیرند می‌تواند کمتر از یک نانومتر باشد. در واقع آشفته‌گی گرمایی موجب گره‌خوددگی و تغییر مدام مولکول می‌شود (شکل ۷-۱-۷). از نظر آماری محتملترین مقدار طول یا دیشه میانگین مربعها، \bar{L} ، برابر است با $\sqrt{l m}$.



شکل ۷-۱-۶ چرخش پیوند (بوتان). با آنکه زاویه پیوند برابر با ۱۰۹.۵° و ثابت است طول دو انتهای $a-d$ تا $a-d'$ تغییر می‌کند. مولکولهای بزرگ تغییرات بسیار زیادتری دارند.

* ولی هنوز از این صورت استفاده می‌شود زیرا پاسخگوی بسیاری از نیازهاست.



شکل ۷-۱-۷ صورت بندی گره خورده.
 چون پیوند C-C می تواند بچرخد، (شکل ۷-۱-۶)، مولکولهای بزرگ معمولاً گره می خورند و میانگین طول، L ، آنها نسبتاً کوتاه است (رابطه ۷-۱-۴).

$$L = n\sqrt{m} \quad (۷-۱-۵)$$

در این رابطه L طول پیوند است یعنی 154 nm برای C-C است (جدول ۲-۳-۱) و m تعداد پیوندهاست. برای پلی وینیل کلرید (شکل ۷-۱-۳) به ازای هر مر، دو پیوند وجود دارد، در نتیجه $m = 2n$ و طبق رابطه (۷-۱-۵) L برای مولکولی با ۳۰۷ مر، مساوی 38 nm می شود.

صورت بندی گره خورده در شکل ۷-۱-۷ از این نظر مهم است که کش آمدن و انقباض لاستیک بر اساس آن صورت می گیرد. این شکل همچنین می تواند توضیح دهد که چرا لاستیک کشیده شده ضریب انبساط گرمایی منفی دارد (بخش ۷-۵).

مثال ۷-۱-۱ ترکیب تفلون شبیه به پلی اتیلن در شکل ۲-۳-۷ (ب) است. فقط در آن اتمهای فلوئور به جای اتمهای هیدروژن قرار دارند. بنابراین مر آن (C_2F_4) است. الف) اگر جرم مولکول 33000 amu (یا 33000 گرم بر مول) باشد، درجه پلی مر شدن چقدر است؟ ب) در هر گرم چه تعداد مولکول وجود دارد؟

حل: الف) جرم مر برابر $100 \text{ amu} = (12)(2) + (19)(4)$ است؛

$$\frac{(33000 \text{ amu/مولکول})}{(100 \text{ amu/مر})} = 330 \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

$$\frac{(0.6 \times 10^{24} \text{ مولکول})}{(33000 \text{ g})} = \frac{1.8 \times 10^{19}}{\text{g}} \quad (\text{ب})$$

توضیح. مانند مثال ۲-۳-۱ در مورد اتیلن، مر را به جای CF_2 ، C_2F_4 در نظر می گیریم. این گروه سه اتمی نمی تواند مونومر تشکیل دهد، زیرا اگر فقط در اتم فلوئور

* این رابطه با استفاده از محاسبات آماری به دست آمده است و به ریاضیات بالانری نیاز دارد که از حد این کتاب خارج است.

موجود باشد، فقط دو پیوند از چهار پیوند کربن مورد استفاده قرار گرفته اند. با تشکیل پیوند دو گانه بین کربنها، C_4F_6 می تواند پیوند لازم را داشته باشد. ▲

مثال ۷-۱-۲ محلولی حاوی ۱۵ g آب، ۲ g اتانول (C_2H_5OH) و ۱ g قند ($C_6H_{12}O_6$) است. الف) کسر جرمی هر جزء مولکولی چقدر است؟ ب) کسر تعداد هر جزء مولکولی چقدر است؟

حل:

	W_i	الف)
H_2O	$15g/20g = 0.75$	
C_2H_5OH	$2g/20g = 0.10$	
$C_6H_{12}O_6$	$1g/20g = 0.05$	

ب) مبنا: ۲۰ amu

	مولکول	X_i
H_2O	$15 \text{ amu} / 18 \text{ amu} = 0.833$	$= 0.900$
C_2H_5OH	$2 \text{ amu} / 46 \text{ amu} = 0.043$	$= 0.094$
$C_6H_{12}O_6$	$1 \text{ amu} / 180 \text{ amu} = 0.006$	$= 0.006$
		<u>0.946</u>

▲

مثال ۷-۱-۳ می دانیم که توزیع اندازه مولکولی پلی وینیل کلرید (PVC) طبق شکلهای ۷-۱-۵ (الف) و (ب) است که به ترتیب بر حسب کسر جرمی و کسر تعدادند. الف) «میانگین جرمی» اندازه مولکولی چقدر است؟ ب) «میانگین عددی» اندازه مولکولی چقدر است؟ ج) درجه پلی مرشدن n بر اساس M_m چقدر است؟

حل: الف) و ب)

فواصل اندازه مولکولی		مقدار متوسط کسر جرمی		مقدار متوسط کسر عددی	
$(X_i)(M_i)$	X_i	$(W_i)(M_i)$	W_i	$(X_i)(M_i)$	X_i
amu	شکل ۷-۱-۵	amu	شکل ۷-۱-۵	amu	شکل ۷-۱-۵
	[(ب)]		[(الف)]		
۱۹۵۰	۰۰۲۶	۹۰۰	۰۰۱۲	۷۵۰۰	۵-۱۰۰۰۰
۲۸۷۵	۰۰۲۳	۲۲۵۰	۰۰۱۸	۱۲۵۰۰	۱۰-۱۵۰۰۰
۴۲۰۰	۰۰۲۲	۴۵۵۰	۰۰۲۶	۱۷۵۰۰	۱۵-۲۰۰۰۰
۳۳۷۵	۰۰۱۵	۴۷۲۵	۰۰۲۱	۲۲۵۰۰	۲۰-۲۵۰۰۰
۲۲۰۰	۰۰۰۸	۳۸۵۰	۰۰۱۴	۲۷۵۰۰	۲۵-۳۰۰۰۰
۱۳۰۰	۰۰۰۴	۲۹۲۵	۰۰۰۹	۳۲۵۰۰	۳۰-۳۵۰۰۰
$\Sigma = ۱۵۹۰۰$		$\Sigma = ۱۹۲۰۰$			
مولکول/amu		مولکول/amu			
M_n (ب)		M_m (الف)			

ج) amu بر ممر PVC (شکل ۷-۱-۳)

$$(C_2H_3Cl) = ۲۲ + ۳ + ۳۵.۵ = ۶۰.۵ \frac{\text{amu}}{\text{مر}}$$

$$\text{بر اساس } \bar{M}_m = \frac{(\text{مولکول/amu}) (۱۹۲۰۰ \text{ amu/مولکول})}{(۶۰.۵ \text{ amu/مر})} = ۳۰۷ \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

توضیح. هر جا توزیعی از اندازه وجود دارد، اندازه مولکولی «میانگین عددی» همیشه کمتر از مقدار «میانگین جرمی» است زیرا در فواصل با اندازه کوتاه‌تر، تعداد مولکولهای کوچکتر در هر گرم زیادتر است، با زیاد شدن گستره توزیع، دو میانگین از هم فاصله می‌گیرند.

مثال ۷-۱-۴ مولکول پلی اتیلن $(C_2H_4)_n$ (شکل ۷-۱-۴ را ببینید)، با جرم مولکولی 22400 amu در حلال مایعی حل شده است. مطلوب است تعیین الف) بیشترین فاصله ممکن بین دو اتمهای مولکول پلی اتیلن (بدون آنکه زاویه پیوند $C-C-C$ از 109.5° تغییر کند). ب) کمترین فاصله. ج) فاصله‌ای که احتمالش از همه بیشتر است.

$$\text{حل:} \quad \left(\frac{28 \text{ amu}}{\text{مر}} \right) \left(\frac{22400 \text{ amu}}{\text{مولکول}} \right) = \text{درجه پلی مرشدن}$$

$$= 800 \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

بنابراین

$$1600 = \text{پیوندها}$$

از جدول ۲-۳-۱

$$l = 0.154 \text{ nm}$$

$$\text{الف) } (2 / \sin 109.5^\circ) (0.154 \text{ nm}) (1600) = 200 \text{ nm} \quad \text{طول « مسیر دندان اره‌ای »}$$

$$\text{ب) در صورت تماس دو انتها} \quad 0.154 \text{ nm} \sim \text{کمترین فاصله}$$

$$\text{ج) } L = 0.154 \text{ nm} / \sqrt{1600} = 0.038 \text{ nm} \quad \text{رابطه (۷-۱-۴)}$$

توضیح. از آنجا که مولکول دارای آشفتگی گرمایی مداوم است، بعید است که طول به 200 nm برسد. برای آنکه کشیده شود و به آن طول برسد باید نیرویی به کار رود، علاوه بر این نیروی لازم در دماهای بالاتر بیشتر می‌شود زیرا بسا افزایش آشفتگی گرمایی گره خوردگی پایاتر می‌شود. ▲

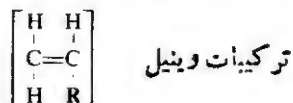
۷-۲ پلی‌مرهای خطی

بسیاری از پلی‌مرهای متداول از مولکولهای بزرگ یک بعدی تشکیل یافته‌اند. مثلاً پلی‌وینیل را می‌توان نام برد که ساختار آنها از این قرار است



(در اینجا **R** رادیکال متنوعی طبق جدول ۷-۲-۱ است). پلی‌استرها، پلی‌ادرنانها و پلی‌آمیدها نیز مولکولهای خطی‌اند. و بالاخره لاستیکها نیز مولکول خطی (و بسیار گره خورده) دارند. سه مر از لاستیکهای ساده در جدول ۷-۲-۲ ذکر شده است. دونوع واکنش

جدول ۷-۲-۱ مولکولهای نوع وینیل



R

—H اتیلن


—Cl وینیل کلرید

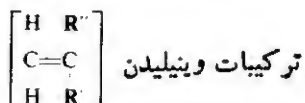
—OH وینیل الکل

—CH_۳ پروپیلن

—OCOCH_۳ وینیل استات

—C≡N اکریلونیتریل

— استیرن (وینیل بنزن)



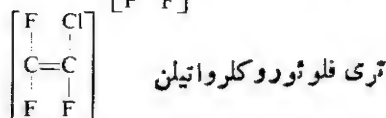
R''

R'

—CH_۳ ایزوبوتیلن

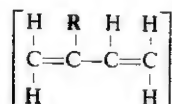
—Cl وینیلیدن کلرید

—COOCH_۳ متیل متااکریلیت



پلی شدن را بررسی می کنیم که عبارت اند از افزایشی و تراکمی. بعداً خواهیم دید که در طول زنجیرهای مولکول خطی، مرها کاملاً منظم نیستند و پیکربندیهای گوناگونی دارند.

جدول ۲-۲-۷ مولکولهای نوع بوتادین

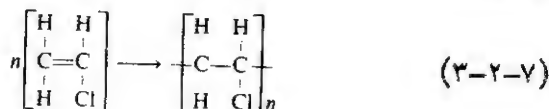
**R**

-H بوتادین

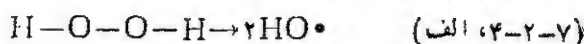
-Cl کلروپرن

-CH₃ ایزوپرنپلی‌مرشدن افزایشی. مونومر وینیل C₄H₆R است، یعنی

وینیلها دو عاملی‌اند زیرا از دو انتهای جلو و عقب می‌توانند واکنش انجام دهند. برای پلی‌وینیل کلرید که در آن R- در رابطه (۲-۲-۷)، Cl- است این واکنش به‌قرار زیر است

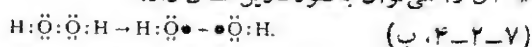


رشد پلی‌مرها را به‌سادگی می‌توان به‌جفت‌شدن واکنش‌های قطار تشبیه کرد، ولی فرایند کار پیچیده است زیرا بادنبال هم‌چیدن مونومرها، واکنش پلی‌مرشدن افزایشی به‌طور خودکار انجام نمی‌شود. واکنش ابتدا باید شروع شود بعد گسترش یافته، سپس خاتمه یابد. شروع کننده واکنش معمولاً یک رادیکال آزاد مانند مولکول گسترده H₂O₂ است



در اینجا نقطه. * نمایانگر اربیتال پرنشده جفت HO است* و بنابراین به‌سادگی واکنش

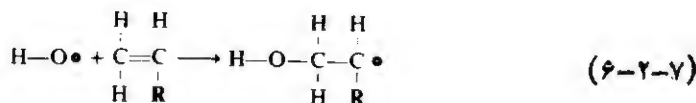
* آن را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:



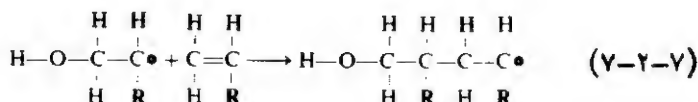
در اینجا هیچ‌یک از رادیکالهای OH* با رادار نیستند. در عوض یون OH⁻ بار الکترون اضافی را حمل می‌کند:



انجام خواهد داد. مثلاً در برخورد بامولکول وینیل



بازهم رادیکال آزاد (و بلندتری) وجود دارد که می‌تواند با دیگری واکنش انجام دهد.



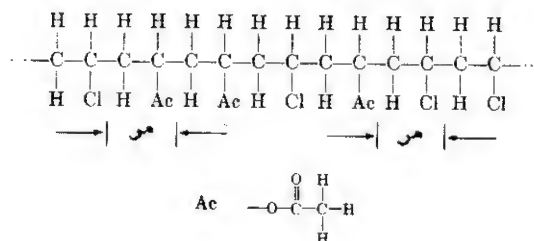
واکنش زنجیری همچنان گسترش می‌یابد تا مولکولی متشکل از تعداد زیادی واحد، یعنی پلی‌مر حاصل شود.

نیروی محرکه برای رابطه (۶-۲-۷) و واکنشهای پیاپی، تغییر انرژی است. مثلاً طرف چپ رابطه (۷-۲-۷) شامل پیوند دوگانه $\text{C}=\text{C}$ است در حالی که طرف راست آن یک جفت پیوند یگانه $\text{C}-\text{C}$ اضافه دارد. سایر پیوندها تغییری نکرده‌اند. جدول ۱-۳-۲ نشان می‌دهد پیوندهای $\text{C}=\text{C}$ به ازای هر مول (هر مول شامل $10^{24} \times 6$ عره پیوند است)، 680 کیلوژول انرژی دارند، هر پیوند $\text{C}-\text{C}$ به ازای هر مول، 370 کیلوژول انرژی دارد. برای حذف پیوند دوگانه رابطه (۷-۲-۷)، باید $10^{18} \times 101 + 70$ ژول انرژی اعمال کرد؛ با تشکیل دو پیوند یگانه ($10^{18} \times 680$) (۲) - ژول آزاد می‌شود. در نتیجه $10^{18} \times 101$ ژول انرژی یا 60 kJ/mole در رابطه (۷-۲-۷) به خارج داده می‌شود (-). ترکیبهای پلی‌مری حاصل از مونومرهای اولیه پایدارترند زیرا انرژی از دست داده‌اند.*

واکنشهای طبق روابط (۶-۲-۷) و (۷-۲-۷) ادامه می‌یابند تا آنکه به دلیل (۱) تمام شدن مونومرها یا (۲) برخورد و متصل شدن دو انتهای رشدکننده زنجیرها، واکنشها خاتمه یابند. به این ترتیب مولکولهایی با اندازه‌های مختلف حاصل می‌شود زیرا مولکولهای مختلف در زمانهای مختلفی رشد خود را متوقف می‌کنند (شکل ۱-۷-۵).

کوپلی‌مرها، هریک از وینیل‌بلی‌مرها که در بالا ذکر شد تنها یک نوع مر دارند. پلی‌اتیلن فقط مرهای (C_2H_4) دارد، پلی‌وینیل کلراید تنها شامل مرهای $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})$ است و پلی‌وینیل الکل فقط از مرهای $(\text{C}_2\text{H}_3\text{OH})$ تشکیل شده است. وقتی دانش‌ورزان دریافتند که پلی‌مرهای افزایشی که شامل مخلوطی از دو یا چند مر مختلف اند، دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مرغوبتری هستند در تکنولوژی تولید پلی‌مرها پیشرفت قابل توجهی به وجود آمده.

* عامل دیگری که باید به‌شمار آید «آنتروپی» است، ولی مسئله فوق را تنویر نمی‌دهد.

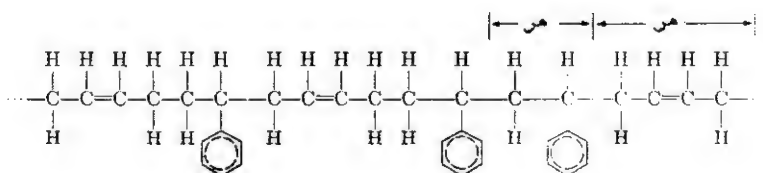


شکل ۷-۲-۱ کوبلی مرشدن وینیل کلرید و وینیل استات. این واکنش با محلول جامد در بلورهای فلزی و سرامیک، قابل مقایسه است.

مثلا ممکن است در زنجیر پلی مری مرهای وینیل کلرید و وینیل استات موجود باشد (شکل ۷-۲-۱). مولکول حاصل کوپلیمر نامیده می شود. خواص کوپلیمر حاصل ممکن است با خواص هر کدام از اجزای ترکیب کاملا متفاوت باشد. جدول ۷-۲-۳ خواص و کاربردهای گوناگون مخلوط وینیل کلرید- وینیل استات را با درجات مختلف کوپلیمر شدن نشان می دهد. با توجه به تنوع زیادی که در این خواص دیده می شود می توان پلاستیکهایی با کاربردهای مختلف تهیه کرد.

بنی‌مهرهای ABS کوپلی‌مهرهای سه‌تایی‌اند که از اکریلونیتریل، بوتادین و استیرن تشکیل شده‌اند (جدولهای ۱-۲-۷ و ۲-۲-۷). کوپلی‌مردن در زمینه تولید لاستیکهای مصنوعی کاربرد بسیار دارد. مثلاً لاستیکهای بونا - S کوپلی‌مهرهای بوتادین و استیرن‌اند (شکل ۲-۲-۷). در اصل کوپلی‌مرها با آلیاژهای محلول جامد فلزات، مثلاً برنج و مفرغ قابل مقایسه‌اند زیرا در ساختار اصلی بیش از یک جزء را شامل می‌شوند.

یکی روشنی تراکمی. برخلاف واکنشهای افزایشی که اساساً جمع شدن مولکولهای مجزا و تشکیل پلیمر است، واکنشهای تراکمی مولکول دیگری که غیر قابل پلیمر شدن است، به عنوان محصول فرعی تولید می کنند. این محصول فرعی معمولاً آب یا مولکول ساده‌ای

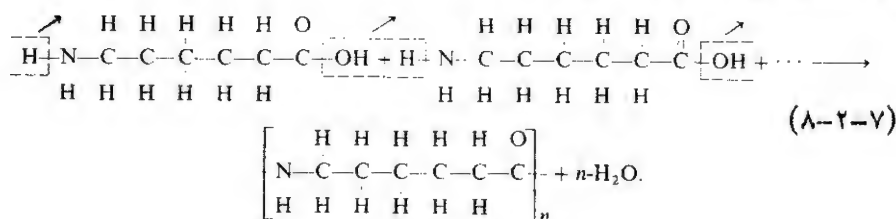


شکل ۷-۲-۲ کوپلی مرشدن بوتادین و استیرن. بسیاری از لاستیکهای مصنوعی بر این اساس تولید می‌شوند. (در حلقهٔ یزن هیدروژنها رسم نشده‌اند.)

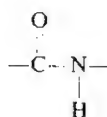
جدول ۷-۳ کوپلی مرهای وینیل کلرید استات: رابطه بین ترکیب، وزن مولکولی، و کاربرد

کاربردهای کلی	وزن مولکولی	گستره میانگین	نسبت تعداد مرهای کلرید به مرهای استات	درصد وزنی وینیل کلرید	مورد
عمدتاً به چسبها محدود می شود.	۱۵۰۰۰-۴۸۰۰	۰	۰	۰	پلی وینیل استات راست زنجیر
روکش فوطیهای کنسر ومواد غذایی؛ برای پوشش دادن آن روی سطوح به حد کافی در حلالهای کتون حل می شود.	۹۵۰۰-۸۵۰۰	۹-۸	۸۷-۸۵		کوپلی مرهای کلرید استات
پلاستیکهایی با استحکام خوب و مقاوم در حلالهایند؛ و قابلیگی آنها به روش تزریقی است.	۱۰۵۰۰-۹۵۰۰	۹-۸	۸۷-۸۵		
الیاف مصنوعی که با چرخش خشک ساختمی شوند؛ مقاومت عالی در مقابل حلالها و نمکها دارند.	۲۳۰۰۰-۱۶۰۰۰	۱۳-۱۰	۹۰-۸۸		
جانشین لاستیک روکش سیمهای برق شده است؛ باید به حالت نرم باشد؛ با فشار کاری شکل می گیرد.	۲۲۰۰۰-۲۰۰۰۰	۲۶	۹۵		
کاربردهای محدود صرفاً تجارنی دارد.	—	—	۱۰۰		پلی وینیل کلرید راست زنجیر

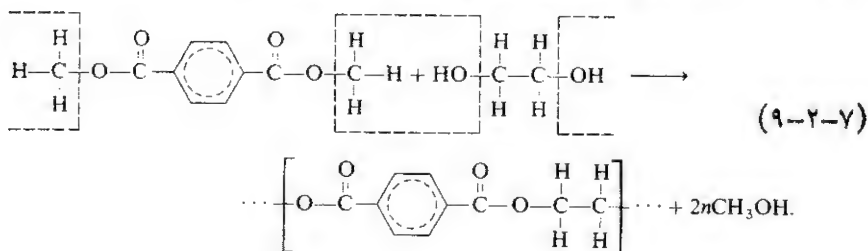
چون HCl یا CH_3OH است. نایلون مثال آشنایی از پلی مرهای تراکمی است. واکنش پلی مرشدن آن به قرار زیر است



هیدروژن و OH از دو انتهای مولکول گرفته می شود و مولکولهای کوچک H_2O به صورت محصول فرعی حاصل می شوند. آب می تواند از پلاستیک جدا شود و پلی مر خطی را با چند واحد $-\text{CH}_2-$ و یک اتصال



برجا گذارد. یکی از پلی استرهای معمولی حاصل واکنش دو واکنشگر است



محصول فرعی تولید شده در این مورد متیل الکل است. رشد پلی مر ادامه می یابد تا مولکول خطی بزرگی حاصل شود.^{۱۰} واکنشهای تراکمی در روابط (A-2-7) و (9-2-7)

* حاصل رابطه (A-2-7) معمولاً نایلون-۶ نامیده می شود زیرا هر مرشش کربن دارد. انواع دیگری از نایلونها نیز با استفاده از مرهایی با اندازه های دیگر به وجود می آیند. حاصل رابطه (9-2-7) از نظر تجارتي نامهای مختلفی نظیر داکرون، میلار، تریلن، ترگال، یا ترویرا دارد و اینها به شرکت تولید کننده و شکل فیزیکی آن از قبیل رشته یا لایه بستگی دارند.

۱. حاصل رابطه (9-2-7) نوعی پلی استر است زیرا شامل یک اتصال $-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-$ است.

درست مانند واکنش افزایشی، انرژی آزاد می کنند (مثال ۷-۲-۳). این نیروی محرکه ای است که فرایند را فعال می کند.

رشد پلی مرهای تراکمی هیچوقت به طور مطلق خاتمه نمی یابد. دو انتهای مولکول در حال رشد، فعال باقی می ماند. این برخلاف مولکولهای رشد کننده در واکنش افزایشی رابطه (۷-۲-۷) است که در آن واکنشهای زنجیری فقط در یک جهت رشد می کنند و در نتیجه با اتصال دو زنجیر، واکنش خاتمه می یابد. این تفاوت، در توزیع اندازه مولکولهایی که در نهایت به دست می آیند مؤثر خواهد بود. مولکول تراکمی همیشه می تواند به مولکول دیگری متصل شود و رشد آن ادامه یابد.

مثال ۷-۲-۱ پلی پروپیلن $(H_2C=CHCH_3)_n$ وینیلی است که در آن R ، $-CH_3$ است. در حین پلی مرشدن به ازای هر گرم محصول چه مقدار انرژی آزاد می شود؟

حل: مبنا: یک مر، که در آن یک پیوند دو گانه، دو پیوند یگانه تشکیل می دهد

$$\text{گرم} = \frac{36 + 6g}{0.06 \times 10^{24}}$$

$$\text{انرژی لازم} = \frac{680000 J}{0.06 \times 10^{24}}$$

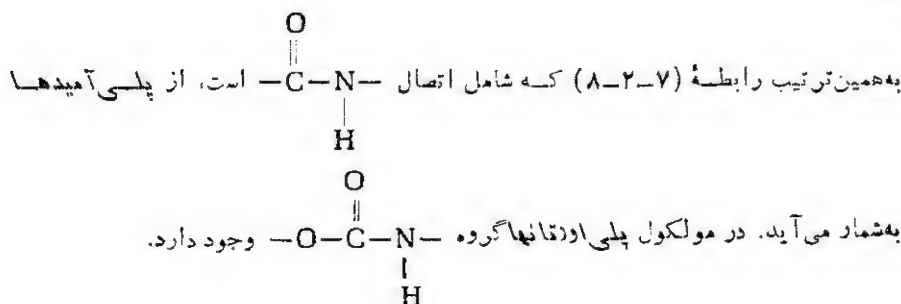
$$\text{انرژی آزاد شده} = - \frac{2(370000 J)}{0.06 \times 10^{24}}$$

$$\text{انرژی به ازای هر گرم} = \frac{+680000 - 2(370000)}{42 g}$$

$$= -1230 J$$

توضیح. همه وینیلها در حین پلی مرشدن به ازای هر مول: $60 kJ$ انرژی آزاد

→



▲ می‌کنند زیرا در همه آنها یک پیوند دو گانه به دو پیوند یگانه تبدیل می‌شود.

مثال ۷-۲-۲ کوبلی مری حاوی ۹۲ درصد وزنی وینیل کلرید و ۸ درصد وزنی وینیل استات است. کسر مری VAC چقدر است؟

حل: از جدول ۷-۲-۱

$$VC = (C_2H_3Cl) = 24 + 3 + 35.5 = 62.5 \text{ amu/مر}$$

$$VAC = (C_2H_3OCOCH_3) = 48 + 6 + 32 = 86 \text{ amu/مر}$$

مینا: ۱۰۰ amu

$$VC: 92/62.5 = 1.472 = 0.941$$

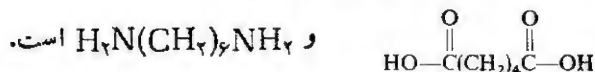
$$VAC: 8/86 = 0.093 = 0.059$$

مر ۱.۵۶۵

توضیح. این کوبلی مری به ازای هر مراستات تقریباً ۱۶ مر کلرید دارد. کاربردهای ممکن آن در جدول ۷-۲-۳ درج شده است.

▲

مثال ۷-۲-۳ نایلون-۶۶ پلی مری تراکمی از



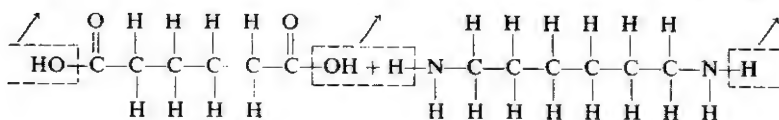
(الف) ساختار این دو مولکول را رسم کنید؛

(ب) نشان دهید که پلی مرشدن تراکمی چگونه صورت می‌گیرد؛

(ج) به ازای هر مول H_2O چقدر انرژی آزاد می‌شود؟

حل:

(الف و ب)



(ج) برای تولید یک مول ($10^3 \times 60$) آب، باید هفتمین تعداد پیوند $C=O$ و $H-N$ از بین برود و پیوندهای $C-N$ و $H-O$ به تعداد مساوی تشکیل شود.

پیوند حذف شده

پیوند تشکیل شده

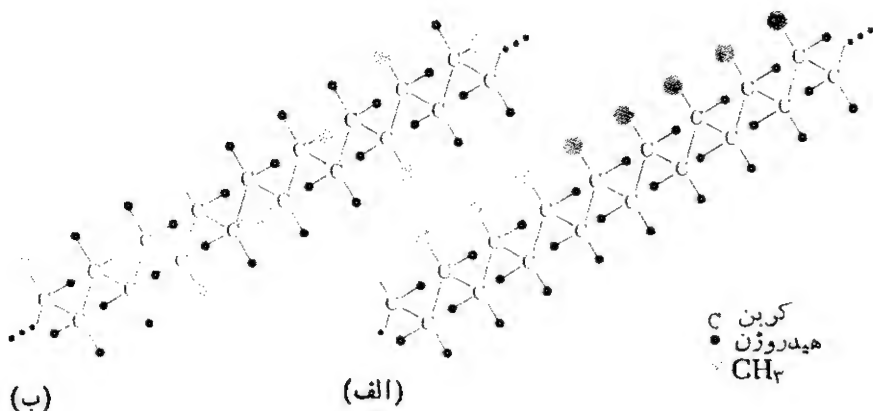
C-O	+۳۶۰	کیلوژول بر مول
H-N	+۲۳۰	
C-N	-۳۰۵	کیلوژول بر مول
H-O	-۵۰۰	
	-۸۰۵	
	+۷۹۰	

اختلاف انرژی خالص ۱۵ - کیلو ژول بر مول (یا ۳۵ - کیلو کالری بر مول) است. ▲

۳-۷ بی‌نظمیهای مولکولی

یک مولکول خطی به ندرت نظم هندسی شبیه به شکل ۷-۱-۴ دارد. آشفته‌گی گرمایی در آن گره ایجاد می‌کند (شکل ۷-۱-۷). مگر آنکه زنجیر پلی‌مر قید داشته باشد. همچنین گفته شد که می‌توان کوپلی‌مرهایی با بیش از یک نوع مر تولید کرد. خواهیم دید که برخی از بی‌نظمیها به این دلیل وجود می‌آیند که برای اتصال مونومرها در زنجیر پلی‌مر، چند تبدیل صورت می‌گیرد و سایر بی‌نظمیها مانند گروههای قطبی به‌طور ذاتی در بسیاری از زنجیرها وجود دارند. هر کدام از این بی‌نظمیها بر نحوه قرارگیری مولکولهای مجاور و رفتار مکانیکی مواد حاصل اثر می‌گذارد.

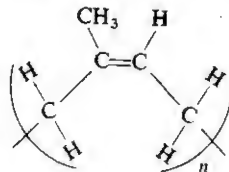
از آنجا که مولکولها طویل و ناهم‌هنگ‌اند و جاذبه بین آنها نیز ضعیف است بلوری‌شدن در پلی‌مرها مشکل خواهد بود. به‌علاوه خواهیم دید که این بی‌نظمیها ممانعت بیشتری ایجاد می‌کنند. بنابراین عیوب پلی‌مر را دقیقاً بررسی خواهیم کرد.



شکل ۷-۳-۱ ایزومرهای فضایی (پلی‌پروپیلن). (الف) تک‌آرایش؛ (ب) بی‌آرایش.

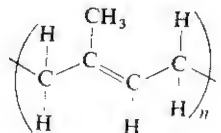
ایزومرهای فضایی. در زنجیر مولکولی شکل ۷-۳-۱ (الف) نظم زیادی در طول پلی‌مرز دیده می‌شود. نه تنها افزایش مونومرها و تشکیل پلی‌مر خطی ترتیب مشخصی دارد، بلکه مرهای پروپیلن نیز چنان نظم‌ی دارند که رادیکالها همیشه در موقعیتهای معین درون مر قرار می‌گیرند. چنین نظم‌ی تلك آرایش نام دارد و برخلاف ترتیب دیگر یعنی بی‌آرایش است که در شکل ۷-۳-۱ (ب) دیده می‌شود.

مثال دوم از آرایش پلی‌مری، لاستیکهایی اند که از مولکولهای نوع بوتادین ساخته می‌شوند (جدول ۷-۲-۲). لاستیک طبیعی از پلی‌مر شدن مر ایزوپرن با ساختار زیر به وجود می‌آید



(۱-۳-۷)

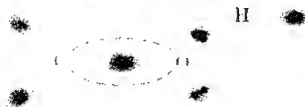
در این حالت دو کربنی که پیوند دوگانه دارند دارای يك گروه CH_3 و يك هیدروژن در يك طرف زنجیرند. این آرایش که سببی نامیده می‌شود چون موجب کمائی شدن مر می‌شود در رفتار زنجیر بسیار اهمیت دارد (رابطه ۷-۳-۱). حالت دیگر دارای گروه CH_3 در يك طرف و هیدروژن تنهایی در طرف دیگر زنجیر است و آرایش ترانس را به وجود می‌آورد.



(۲-۳-۷)

اگر چه این دو ایزومر ایزوپرن ترکیب یکسانی دارند و لسی از نظر ساختار متفاوت اند و بنا بر این خواص مختلفی دارند. لاستیک طبیعی با ساختار نوع سبب خود به دلیل کمائی بودن مر، دارای زنجیر بسیار گره خورده‌ای است. پلی‌مر نوع ترانس که گوتاپرش نام دارد زاویه پیوندی دارد که بیشتر شبیه به پلی‌مرهای خطی است (شکل ۷-۳-۴). موقعیتهای اشباع نشده در طرفین پیوند دوگانه یکدیگر را موازنه می‌کنند. در نتیجه خواص بسیار متفاوت اند.

گروههای قطبی. بین زنجیرهای مجاور پلی‌اتیلن جاذبه نسبتاً کمی وجود دارد. در نتیجه به صورت پارافینهای بسیار بلندند و همان مشخصات مومی را دارند. هنگامی که تنش برشی اعمال می‌شود مولکولها روی هم می‌لغزند. سایر مولکولها جاذبه بین مولکولی بزرگتری نشان می‌دهند بخصوص اگر دارای گروههای قطبی باشند: یکی از این گروههای قطبی

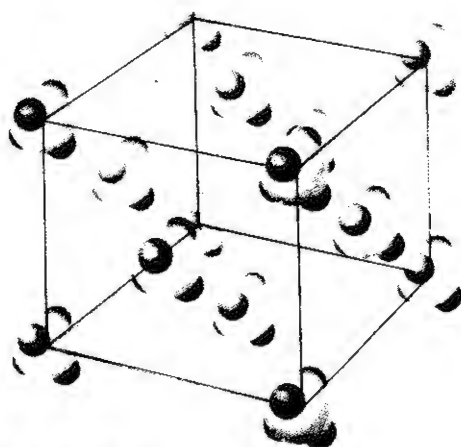


(۳-۳-۷)

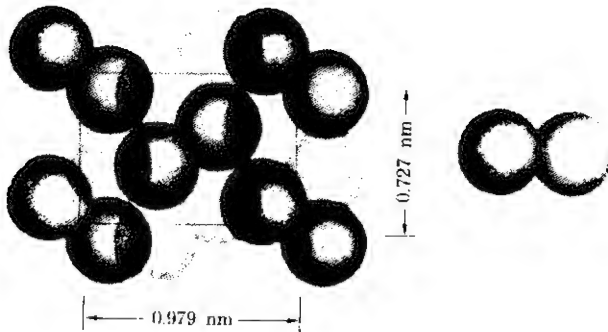
$C=O$ در روابط (۷-۲-۸) و (۷-۲-۹) است. این گروه، یک دوقطبی الکتریکی و یک اکسیژن در انتهای منفی آن دارد. دوجفت الکترون تنها در اکسیژن (به شکل ۲-۳-۴ (ب) رجوع کنید)، اتمهای هیدروژن مولکولهای مجاور را با قدرت جذب می کنند زیرا اتمهای هیدروژن در انتهای پیوند کووالانسی، پروتون (+) ساده اند. وجود این گروههای قطبی خواص پلیمر را به میزان قابل ملاحظه ای تحت تأثیر قرار می دهد. مثلاً اختلاف بین نایلون و پلی اتیلن را می توان به این گروههای قطبی نسبت داد زیرا مولکولهای هردو همان واحدهای CH_2 را دارند.

بلورهای مولکولی. از آنجا که هر مولکول حاوی بیش از یک اتم است، در بلورهای مولکولی باید به آرایش فشردگی نظر بیفکنیم که از آنچه در بلورهای فلزی است پیچیده تر است. متان یکی از مولکولهایی است که تجسم کردنشان ساده تر است، زیرا مولکولهای CH_4 تقارن نسبی دارند و تقریباً شبیه به کره اند (شکل ۷-۳-۲). یسدمولکول پیچیده ای نیست زیرا مولکول آن فقط دو اتم دارد، I_2 . ولی این مولکول دو اتمی کروی نیست. بنابراین ید بلوری سلول واحد مکعبی تشکیل نمی دهد و به جای آن، مطابق با شکل ۷-۳-۳، مکعب مستطیلی ($a \neq b \neq c$) است.

بلوری شدن پلی اتیلن پیچیده تر است زیرا مولکول تا خارج از سلول واحد امتداد می یابد (شکل ۷-۳-۴). با این حال از این شکل می توان دریافت که در سلول واحد

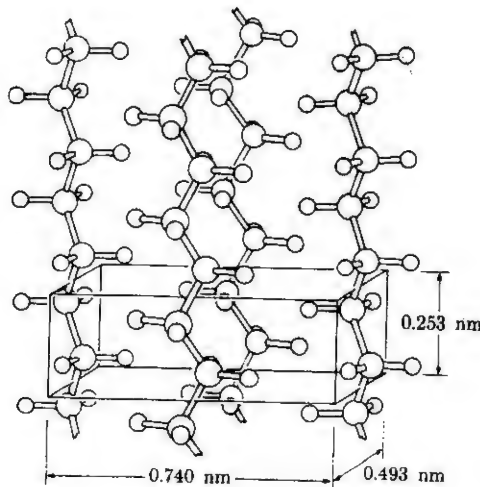


شکل ۷-۳-۲ ترکیب FCC (متان CH_4) هر نقطه شبکه fcc حاوی مولکولی پنج اتمی است. متان در $183^\circ C - (90K)$ منجمد می شود بین $20K$ و $90K$ مولکولها می توانند در مکان شبکه ای خود بچرخند، زیر $20K$ مولکولها ترتیب یک شکلی، مثل آنچه در اینجا نشان داده شده، دارند.



شکل ۳-۳-۷ بلور مولکولی (ید). مولکول I_2 در ساختار بلوری تکرار شونده به صورت واحد عمل می‌کند. این شبکه مکعب مستطیل ساده است زیرا $a \neq b \neq c$ و مکانهای مرکز وجوه با مکانهای گوشه‌ها یکسان نیست. (مولکولها جهتگیری متفاوتی دارند). محورهاى سلول واحد زاویه 90° می‌سازند.

پلی اتیلن، دو مر وجود دارد. در مثال ۱-۳-۷ چگالی پلی اتیلن ایزدئال را محاسبه کرده جواب 1.01 g/cm^3 را به دست خواهیم آورد. چگالی به دست آمده از پلی اتیلنهای تجاری، ۵ تا ۱۰٪ کمتر از این مقدار است (جدول ۱-۳-۷)، زیرا احتمال آنکه مولکولهای



شکل ۴-۳-۷ بلور مولکولی (پلی اتیلن). زنجیرها در امتداد طول قرار گرفته‌اند. سلول واحد مکعب مستطیل با زوایای 90° است.

جدول ۷-۳-۱ مشخصات پلی اتیلنها

پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE)	پلی اتیلن با چگالی زیاد (HDPD)	
۰٫۹۲	۰٫۹۶	چگالی، $(g/cm^3) Mg/m^3$
تقریباً صفر	~۵۰	بلورینگی، v/o
180×10^{-6}	120×10^{-6}	انبساط گرمایی، $^{\circ}C^{-1}$
۰٫۳۲	۰٫۵۲	رسانندگی گرمایی $(^{\circ}C/m)/(m^2/وات)$
۸۰-۵۵	۱۲۰-۸۰	مقاومت گرمایی برای استفاده مداوم، $^{\circ}C$
۸۵-۸۰	۱۲۵-۱۲۰	۱۰ دقیقه در دمای $^{\circ}C$

بلند پلی اتیلن مانند شکل ۷-۳-۲ به صورت کاملاً ردیف شده «مانند زیپ» باشند کم است. اگر این مولکولها کاملاً ردیف شده نباشند ضریب فشردگی کم می شود و به میزانی می رسد که ۱۰ درصد حجمی «فضای آزاد» بین آنها را موجب می شود.

تشکیل بلور در پلی اتیلن مشکل است* زیرا مولکولهای آن تا صدها سلول واحد ادامه یافته اند. در چنین مسافت زیادی احتمال اینکه زنجیرهای مجاور کاملاً ردیف شده باقی بمانند بسیار کم است بخصوص آنکه زنجیرها هم طول نیستند و تحت آشفتنگی گرمایی و تاشدگی قرار دارند. به علاوه فقط پیوندهای ضعیف و اندروالس آنها را به هم نگه می دارد. بررسی تفرق اشعه X (بخش ۳-۸) نشان می دهد که بلورینگی در پلی اتیلن کم چگالی، بسیار کم است (حدود $\rho_{LDPE} \sim 0.92 g/cm^3$). در پلی اتیلن با چگالی بیشتر (حدود $\rho_{HDPD} \sim 0.96 g/cm^3$) برخی مناطق بلوری می شوند ولی بین آنها نواحی بی شکل نیز یافت می شود به هر حال عملاً نه چگالی کامل مشاهده شده است و نه بلوری شدن کامل.

با توجه به پیچیدگیهای فوق تعجبی ندارد اگر بگویم اکثر پلی مرها می توانند پس از ذوب، سرد شوند و تا دمای اتاق برسند بدون آنکه مولکولهای آنها ردیف شوند و الگوی کاملاً بلوری تشکیل دهند. فوق سرمایه در پلی مرها متداول است بخصوص اگر در طول زنجیر مولکولی بی نظمیهای ساختاری وجود داشته باشد. مثلاً زنجیر بی آرایش که در شکل

* ولی به مشکلی بسیاری از پلی مرهای دیگر نیست.

۷-۳-۱ (ب) نشان داده شده کمتر از زنجیر نك آرایش شکل ۷-۳-۱ (الف) بلوری می شود.

دمای انتقال شیشه ای در پلی مرها، با آنکه مولکولهای پلی مر گره خورده و درگیرند، به علت آشفته گی گرمایی، آنها و مولکولها در پلی مر مایع به طور مداوم از نو آرایش می یابند، و به همین دلیل می توان گفت در مایع باید «فضای آزاد» وجود داشته باشد. با کاهش دما، آشفته گی گرمایی کم می شود و «فضای آزاد» و دامنه نوسانات نیز کاهش می یابد. در نتیجه، کاهش حجم به وجود می آید و تا پایینتر از نقطه ذوب، در گستره مایع فوق سرمایش ادامه خواهد داشت (شکل ۴-۵-۳). ساختار مایع حفظ می شود. در این حال نیز، مانند مایع در دماهای بالاتر، جریان می یابد ولی هرچه دما کم می شود و فضای آزاد بین مولکولها کاهش و ویسکوزیته افزایش می یابد جریان یافتن آن مشکلتر می شود.

پلی مرهایی که بدون بلوری شدن سرد می شوند سرانجام به نقطه ای می رسند که آشفته گی گرمایی در آن برای نو آرایشی مولکولها و به وجود آوردن فردگی بیشتری و اکس در برابر نیروهای اعمال شده خارجی کافی نیست. در این حال پلی مر به طور محسوسی صلبتر و تردتر می شود. به همین ترتیب ضریب انبساط گرمایی آن به تغییرات دامنه نوسانات گرمایی محدود می شود و تغییراتی در «فضای آزاد» بین مولکولها ایجاد نمی کند. با این افزایش صلابت در حین سرد کردن، در شیب منحنی حجم بر حسب دما (شکل ۴-۵-۳) يك ناپیوستگی به وجود می آید این نقطه تغییر در شیب منحنی، نقطه شیشه ای یا دمای انتقال شیشه ای نام دارد. زیرا این پدیده برای تمام شیشه ها وجود دارد. در واقع زیر این دما، پلی مر غیر بلوری درست مانند شیشه های سیلیسی معمولی، شیشه است (اگر چه مسلماً از نوع آلی است) به عکس در فصل ۸ خواهیم دید که شیشه معمولی پلی مری غیر آلی است.

دمای انتقال شیشه ای یا به طور خلاصه تر، دمای شیشه ای، T_g ، به اندازه نقطه ذوب، T_m ، (یا نقطه انجماد) در پلی مرها اهمیت دارد. دمای شیشه ای پلی استیرن (جدول ۷-۲-۱) تقریباً 100°C است؛ بنابراین در دمای اتاق، شیشه ای و ترد است، در مقایسه، لاستیک که T_g آن برابر با 73°C - است حتی در سرمای شدید زمستان نیز خمش پذیر است.

مثال ۷-۳-۱ با استفاده از شکل ۷-۳-۴ چگالی پلی اتیلن کاملاً بلورین را محاسبه کنید.

حل: مر (C_2H_4) با دو انتهای واحد مکعب مستطیلی موازی است که معادل يك مر در هر سلول محسوب می شوند. موازی با دو پهلوی دیگر نیز يك مر وجود دارد. بنابراین در هر سلول واحد کلا دو مر وجود دارد

$$\rho = \frac{2(24 + 4 \text{ amu}) / (0.602 \times 10^{24} \text{ amu/g})}{(0.253 \times 0.740 \times 0.493)(10^{-27} \text{ m}^3)} = 1.01 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

(یا 1.01 g/cm^3)

توضیح. چگالی معمولاً بسته به درجه بلورین بودن در گستره 0.92 تا 0.96 g/cm^3

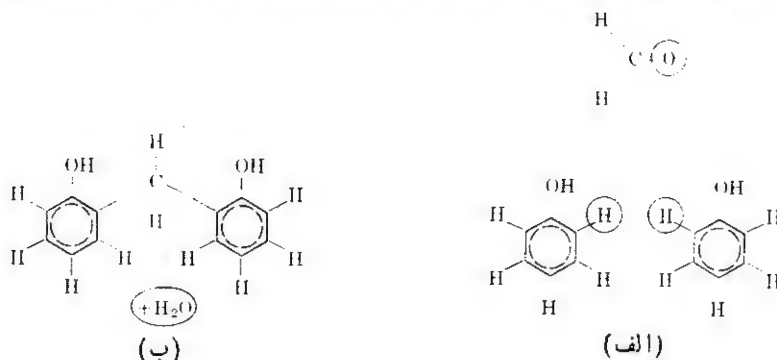
واقع است (مسئله ۷-۳-۳ و جدول ۷-۳-۱ را ببینید). در نتیجه فضای اضافی موجود است که در شیمی «فضای آزاد» نامیده می‌شود. ▲

۷-۴ پلی‌مرهای سه‌بعدی

اگر مونومرهای واکنشگر، چندعاملی باشند یعنی بتوانند به سه یا چند مولکول مجاور متصل شوند می‌توانند ساختار شبکه تولید کنند.

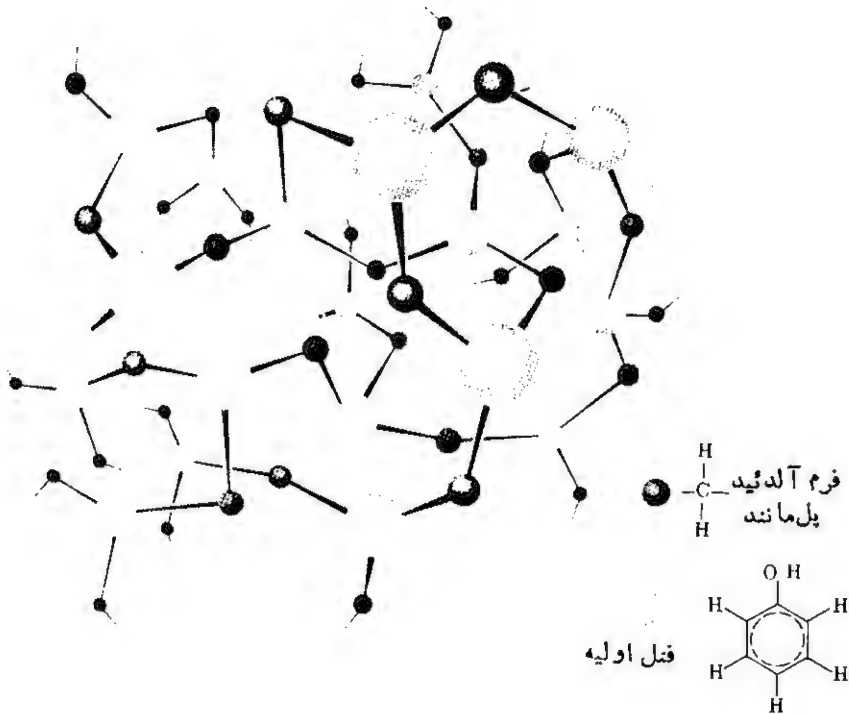
یکی از پلی‌مرهای تراکمی متداول که نامهای تجارتي گوناگونی نیز دارد از فرم آلدهید (CH_2O) و فنل ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) تشکیل می‌شود. آرایش اتمی در چنین مولکولهایی در شکل ۷-۳-۱ دیده می‌شود. در دمای اتاق فرم آلدهید به صورت گاز و فنل جامدی با نقطه ذوب پایین است. پلی‌مرشدن این دو جزء در شکل ۷-۴-۱ (ب) دیده می‌شود. فرم آلدهید یک واحد CH_2 به وجود می‌آورد که بین دو حلقه بنزن در دو فنل بل برقرار می‌کند. دو هیدروژن از حلقه‌های بنزن و یک اکسیژن از فرم آلدهید آب تشکیل می‌دهند که می‌تواند تبخیر و از سیستم خارج شود. واکنش شکل ۷-۴-۱ در چندین نقطه اطراف مولکول فنل ممکن است به وقوع بپیوندد.* حاصل این چندعاملی بودن، به جای زنجیر خطی، شبکه‌ای مولکولی است (شکل ۷-۴-۲).

پلی‌مرهای گرما سخت و گرما نرم. پلی‌مر مورد بحث یعنی فنل - فرم آلدهید (PF) یکی



شکل ۷-۴-۱ واکنش فنل - فرم آلدهید. فنلها ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) هیدروژن و فرم آلدهید (CH_2O) اکسیژن ایجاد می‌کنند که از ترکیب آنها آب به عنوان محصول فرعی حاصل می‌شود. دو حلقه توسط بل $-\text{CH}_2-$ متصل می‌شوند.

* معمولاً حداکثر تعداد ۳ است زیرا فضای موجود برای بیش از سه بل CH_2 کافی نیست. تعداد، توسط همانند فضایی محدود می‌شود.



شکل ۷-۴-۲ ساختار شبکه‌ای واحدهای چندعاملی. تغییر شکل به‌سادگی پلی‌مرهای خطی که از واحدهای دوعاملی تشکیل شده‌اند، رخ نمی‌دهد.

از نخستین پلاستیکهای مصنوعی است. هنگام گرم شدن نرم نمی‌شود زیرا ساختار متبکش آن را صلب نگه می‌دارد. البته این بدان معنی است که به‌همان روش پلی‌مرهای خطی نمی‌توان آن را قالبگیری کرد. برای قالبگیری فنل - فرم آلدئید باید با مخلوطی که به‌طور جزئی پلی‌مری شده است شروع کرد. در این مرحله مخلوط جامد است ولی به‌طور متوسط بین فنل‌های مجاور کم‌تر از سه پل CH_2 وجود دارد، و بنابراین تحت فشار تغییر شکل می‌یابد. با نگاه داشتن آن در 200°C تا 300°C ، پلی‌مر شدن آن تکمیل می‌شود و ساختار سه بعدی جلیبتری به‌دست می‌آید. این عمل سخت شدن با گرما نامیده می‌شود، تولید کنندگان، این نوع پلی‌مرها را گرما سخت می‌نامند. پس از تولید این پلی‌مرها می‌توان بدون آنکه منتظر سرد شدن قطعه شویم آن را از قالب خارج کنیم.

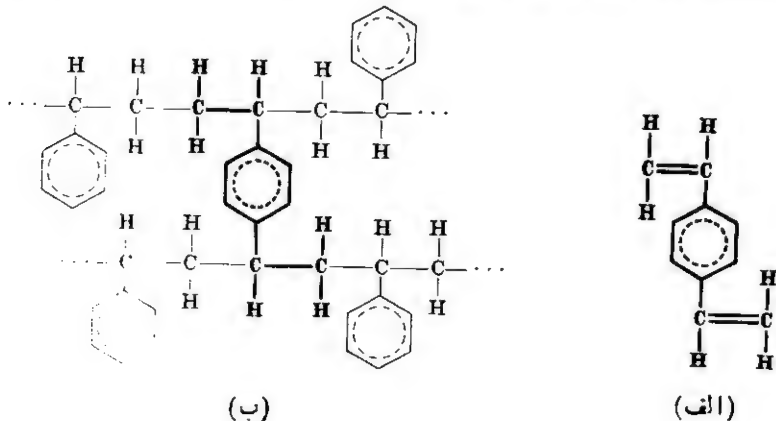
برخلاف گرما سختها، گرما نرمها، پلی‌مر خطی‌اند که می‌توان آنها را در حالت گرم به‌داخل قالب تزریق کرد، زیرا در دماهای بالاتر نرم می‌شوند. گرما نرمها را نباید قبل از سرد شدن از قالب خارج کرد زیرا شکل خود را از دست خواهند داد. درحین قالبگیری پلی‌مر شدن بیشتری انجام نمی‌گیرد. اختلاف اساسی بین گرما سختها و گرما نرمها در این

است که ساختار مولکولی اولی سه بعدی و دومی خطی است. این تفاوت در مراحل تولیدی و هم در کاربردهای مهندسی به علت آثارش روی قالبگیری و کاربرد آن در دماهای بالا اهمیت زیادی دارد.

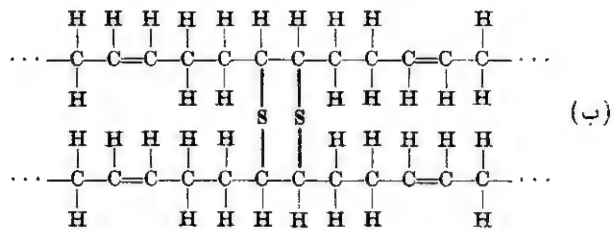
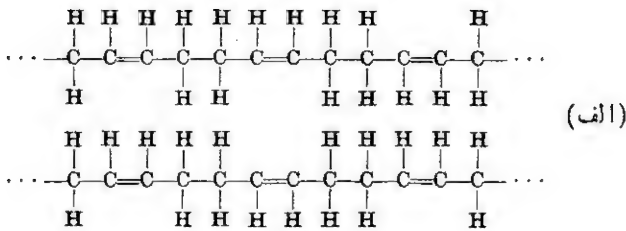
اتصال متقاطع. برخی از مسلولهای خطی، به دلیل خواص ساختاری خود، می توانند به صورت سه بعدی به هم متصل شوند. مولکول شکل ۷-۴-۳ (الف) و حالت پلی مر شده آن را در شکل ۷-۴-۳ (ب) در نظر بگیرید. برخی از مواد که عمداً افزوده می شوند (در این مورد دی وینیل بنزن) موجب اتصال دو زنجیر خطی پلی استیرن به یکدیگر می شوند. به این ترتیب تغییر شکل پلاستیکی تا اندازه ای محدود می شود.

دولکانش لاستیک همان طور که شکل ۷-۴-۴ طرحواره آن را نشان می دهد، نتیجه اتصال متقاطع به وسیله گوگرد است که اثر بسیار قابل توجهی دارد. بدون گوگرد، لاستیک ماده ای نرم و چسناک است، نزدیک به دمای اتاق با تغییر شکل و سکوز جریان می یابد. چنین لاستیکی را نمی توان در تایر اتومبیل به کاربرد زیرا در دمای کاربرد آن، مولکولها ممکن است روی هم بلغزند، بخصوص تحت فشارهایی که اعمال می شود. اتصال متقاطع تقریباً ۱۰٪ از نقاط ممکن به وسیله گوگرد، در وضعیت فوق به لاستیک پایداری مکانیکی می بخشد و این درحالی است که هنوز خمش پذیری لازم را نیز دارد. لاستیک سخت در صد بیشتری گوگرد و در نتیجه اتصالات متقاطع زیادتری دارد. اثر افزودن مقدار بیشتری گوگرد روی خواص لاستیک را می توان با بررسی محصولی از لاستیک سخت مانند شانه جیبی امتحان کرد.

شاخه دار شدن. مولکولهای پلی مر خطی ایده آل که تاکنون مطالعه کرده ایم زنجیرهایی اند

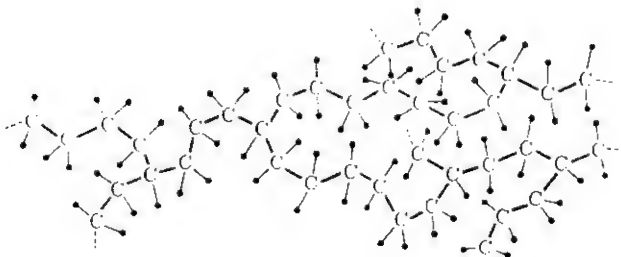


شکل ۷-۴-۳ اتصال متقاطع پلی استیرن. دی وینیل بنزن (الف) چهار عاملی است یعنی چهار نقطه واکنش دارد و ضمن اتصال، به صورت جزئی از دو زنجیر مجاور درمی آید.



شکل ۴-۴-۷ وولکانش (لاستیکهای نوع بوتادین) اتمهای گوگرد زنجیرهای مجاور را به هم اتصال می‌دهند. در این نمایش وولکانش برای هر جفت از مرها دو گوگرد لازم است (حالات دیگری از اتصال متقاطع نیز ممکن است).

که دو انتها دارند، اگرچه حالتی وجود دارند که در آنها زنجیر پلی مر شاخه‌دار می‌شود، شکل ۴-۴-۷ طرحواره آن را نشان می‌دهد. با آنکه یک شاخه غیر عادی به نظر می‌رسد ولی پس از تشکیل پایدار خواهد شد زیرا هر اتم کربن با چهار پیوند و هر اتم هیدروژن با یک پیوند کامل می‌شوند. شاخه‌دار شدن از این نظر مهم است که ساختار سه بعدی درهم پیچیده‌ای به وجود می‌آورد که مانع از تغییر شکل پلاستیکی می‌شود. برای مقایسه، شاخه‌های انبوه یک درخت



شکل ۴-۴-۷ شاخه‌دار شدن (پلی اتیلن). مولکول خطی شکل ۴-۴-۷ شاخه‌دار شده است. نوعی مکانیسم شاخه‌دار شدن در شکل ۴-۴-۷ دیده می‌شود. (اتمهای هیدروژن به وسیله نقطه مشخص شده‌اند).

و دسته‌ای عصا را در نظر بگیرید، حرکت دادن يك شاخه نسبت به همسایه‌هایش، به مراتب مشکلتر از حرکت دادن یکی از عصاهاست.

مثال ۷-۴-۱ برای تولید ۱۰۰ گرم لاستیک چقدر گوگرد لازم است تا بوتادین (C_4H_6) به‌طور کامل اتصال متقاطع تشکیل دهد و در هر اتصال يك گوگرد قرار گیرد؟

حل: هر موبوتادین يك اتم گوگرد (۳۲) لازم دارد $54 = (1)(6) + (12)(4)$

$$\text{محصول } 37gS/100g = 0.37 \text{ یا } \frac{32}{32+54} = \text{کسر گوگرد}$$

مثال ۷-۴-۲ اگر محصول ۱۸/۵٪ گوگرد داشته باشد، چه کسری از بوتادین (C_4H_6) اتصال متقاطع تشکیل داده است؟ (فرض کنید که تمام گوگرد در اتصالات متقاطع مصرف شود و هر اتصال تنها يك گوگرد بگیرد.)

حل: تعداد x اتمهای گوگرد (۳۲) را به‌ازای هر موبوتادین

$$[= (4)(12) + (6)(1) = 54]$$

از نسبت وزنی بوتادین به گوگرد معین کنید.

$$\frac{\text{گرم بوتادین}}{\text{گرم گوگرد}} = \frac{1 - 0.185}{0.185} = \frac{1(54)}{x(32)}$$

$$x = 0.383$$

توضیح. جواب را نمی‌توان از مثال ۷-۴-۱ به‌صورت ۱۸۵/۳۷ به‌دست آورد. **۵**

۷-۵ تغییر شکل مواد پلی‌مری

پلی‌مرها درست مانند فلزات، هم تغییر شکل کشسان و هم تغییر شکل پلاستیکی دارند. به‌طور کلی مدول کشسانی پلی‌مرها کمتر از فلزات است (به‌قسمتهای ۱ و ۳ پیوست* رجوع کنید). این مشخصات غالباً مفیدند زیرا تنش کم به‌ازای هر واحد کرنش، اساس استفاده از لاستیک است همچنین به‌طور کلی پلی‌مرها بسیار آسانتر از فلزات تغییر شکل پلاستیکی می‌یابند، اصطلاح متداول پلاستیک، تأکیدی است بر مزیت کار کردن با پلی‌مرها. در اینجا خواص تگ‌نک پلی‌مرها بررسی نمی‌شود بلکه شاخصی برای مشخصات تکنیکی به‌دست خواهیم

* البته استثنائاتی وجود دارد. سرب و سایر فلزاتی که نقطه ذوب پایین دارند دارای مدول کشسانی کمتر از ۷۰۰۰۰ MPa هستند. بعضی از پلی‌مرها با حلقه‌های آلیفاتیک در استخوانبندی خود مدول بزرگتری دارند. البته این نمونه‌ها حدهای پایینی و بالایی مدول کشسانی مربوط به فلزات و پلی‌مرها را دارند.

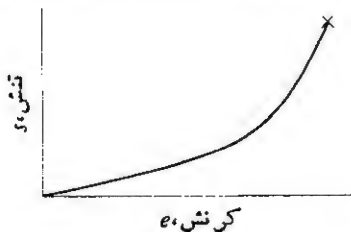
آورد. هنگامی می‌توان در انتخاب پلاستیک موفق بود و محدودیت‌های آن را دانست که بدانیم چه عاملی لاستیک را کشان می‌کند و چرا پلی‌استیرن به‌صورت ویسکوز در قالب جریان می‌یابد.

الاستومرها. پلی‌مرهایی که تغییر شکل کشان زیادی دارند الاستومر نامیده می‌شوند. اساس کرنش زیاد آنها صورت بندی گره خورده است (که در بخش ۷-۱ در مورد آن بحث شد). مثلاً در مثال ۷-۱-۴ متوسط فاصله بین دو انتهای مولکول‌ها 62 nm است. اگر تنش اعمال شود که زنجیر مولکولی را از صورت بندی شکل ۷-۱-۷ منفصل کند، مولکول‌های مثال ۷-۱-۴ چندین نانومتر ازدیاد طول پیدا می‌کنند. البته، حتی در لاستیک‌های غیر وولکانیزه هیچ‌وقت ازدیاد طول به 200 nm نمی‌رسد، اما معمولاً درصد زیادی کرنش کشان به‌وجود می‌آید. از آنجا که صورت‌بندی کشیده شده لاستیک ذاتی نیست؛ پس از برداشتن تنش مولکول‌ها فوراً با چرخش پیوندها دوباره گره می‌خورند.

بازشدن گره و دوباره گره‌خوردن هنگامی اتفاق می‌افتد که الاستومر یا لاستیک در بالاتر از دمای شیشه‌ای خود، T_g باشد تا مولکول‌های مجاور نوآرایی یابند. پایتتراز T_g الاستومر سخت و ترد است.*

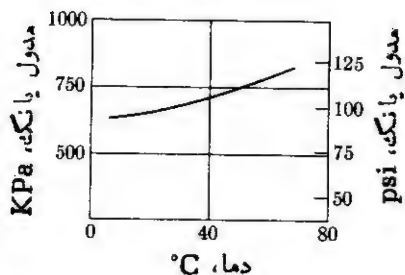
ناحیه کشان منحنی تنش - کرنش لاستیک با این ناحیه در منحنی مربوط به فلزات تفاوت دارد. کرنش اولیه با تنش کم به‌سادگی پدید می‌آید زیرا مولکول‌ها به‌آسانی گره‌خوردگی خود را از دست می‌دهند. این موجب مدول کشسانی پائینی می‌شود، به تدریج که مولکول‌ها مستقیم شده و با هم در یک امتداد قرار می‌گیرند هر افزایشی در کرنش، به تنش بیشتری نیاز دارد (شکل ۷-۵-۱)، و مدول کشسانی افزایش می‌یابد. داده‌هایی که برای لاستیک‌ها در پیوست (ج) نوشته شده‌اند برای نسبت اولیه تنش - کرنش است. زیرا این گستره‌ای است که معمولاً الاستومرها در آن به‌کار می‌روند.

مولکول‌های لاستیک توسط محدود شدن چرخش پیوند که موجب گره‌خوردگی می‌شود کشیده می‌شوند. حال اگر یک نوار لاستیکی کشیده شده گرم شود آشفنگی گرمایی، چرخش و نیروهای منقبض کننده افزایش می‌یابد اگر نیروی وارد شده تغییر نکند نوار



شکل ۷-۵-۱ منحنی تنش - کرنش (لاستیک). با بازشدن گره‌خوردگی مولکول‌ها، به تدریج شیب منحنی (مدول کشسانی) افزایش می‌یابد. (در مورد فلزات، به شکل ۱-۲-۱ رجوع کنید.)

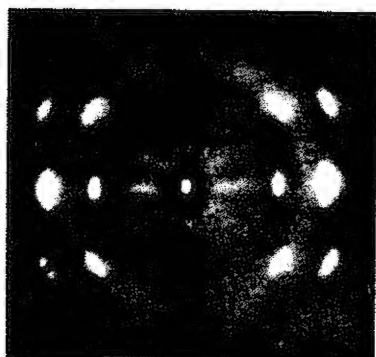
* هرگاه لاستیک کشیده نشده در نیتروژن مایع (196°C یا 77°K) قرار گیرند مانند شیشه شکسته می‌شود. T_g برای لاستیک‌های معمولی در حدود 75°C یا 200°K است.



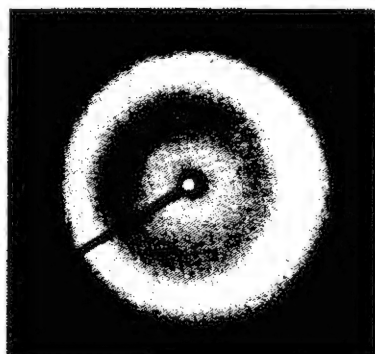
شکل ۷-۵-۲ مدول یا ننگ بر حسب دما (لاستیک کشیده شده). با افزایش آشفته‌گی گرمایی، نیروهای منقبض‌کننده گره‌خوردگی، بزرگتر می‌شوند. بنابراین مدول کشسانی دما افزایش می‌یابد. (به شکل ۳-۳-۶ رجوع کنید).

منقبض می‌شود. بنابراین لاستیک کشیده شده دارای ضریب انبساط گرمایی «منفی» است و مدول یا ننگ با دما افزایش می‌یابد (شکل ۷-۵-۲).
 بالاخره، در پلی مری که تغییر شکل آن به‌طوری است که مولکولهایش در یک امتداد قرار گرفته‌اند تبلود جزئی آسانتر اتفاق می‌افتد. مثلاً لاستیک معمولاً کاملاً بسی شکل و نابلورین است، اما بر اثر نیروی کششی مولکولهای آن جهتگیری مساوی می‌یابند. این موضوع را می‌توان با تفرق اشعه X (شکل ۷-۵-۳) نشان داد؛ این کشیدگی به مولکولهای جهت گرفته مجاور امکان ایجاد آرایه بلورین را می‌دهد. با بلورنگاری می‌توان لکه‌های حاصل از تفرق در شکل ۷-۵-۳ (ب) را به امتداد مولکولی مربوط کرد. اگر تنش برداشته و لاستیک جمع شود، نقاط تفرق ناپدید می‌شوند.

تغییر شکل ویسکوز. تنش برشی موجب جریان یافتن مایع می‌شود. سرعت جریان به‌عکس ویسکوزیته بستگی دارد. بسیاری از پلاستیکها بین دمای شیشه‌ای و دمای ذوب به‌صورت



(ب)

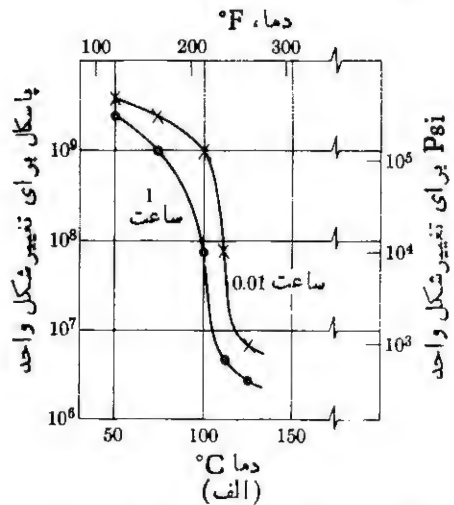
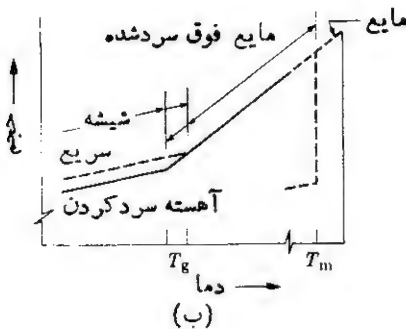


(الف)

شکل ۷-۵-۳ تبلور ناشی از تغییر شکل لاستیک طبیعی (پلی‌ایزوپرن) که با تفرق اشعه X آشکار شده است. (الف) کشیده نشده؛ (ب) کشیده شده.

مابیع فوق سردند. [شکل ۷-۵-۴ (ب)]، و در نتیجه علاوه بر تغییر شکل کشان تحت جریان ویسکوز نیز قرار دارند. از آنجا که ویسکوزیته، η ، معمولاً بالاست، سرعت جریان ممکن است کم باشد. با این حال حتی در سرعتهای کم، اگر پلی مدت زیادی تحت نیرو قرار گیرد تغییر شکل به وجود می آید. همچنین در دماهای بالا تولید پلاستیک را با تغییر شکل درون قالب میسر می سازند.

شکل ۷-۵-۴ (الف) تنش برشی، τ ، لازم برای يك واحد (۱۰۰٪) تغییر شکل پلی متیل متا کریلیت (PMM) را به صورت تابعی از دما نشان می دهد آشکار است که اندکی بالای 100°C تفاوت محسوسی ظاهر می شود این همان دمای شیشه ای T_g شکل ۷-۵-۴ (ب) است. قبلاً گفته شد که بالای دمای شیشه ای مولکولها آزادند که به وسیله آشفته گی گرمایی خم شده و گره بخورند. پایینتر از این دما برای نو آرای مولکولها و فشردگی بیشتر آنها آشفته گی گرمایی کافی نیست، و بنابراین در رفتار گرمایی ساده انفصالی مشاهده می شود. در شکل ۷-۵-۴ (الف) دیده می شود که تنش لازم برای تغییر شکل، در دمای شیشه ای تا بیش از صد برابر تغییر می کند واضح است که دمای شیشه ای در رفتار پلی مرها دمای بسیار مهمی است.



شکل ۷-۵-۴ مسدول ویسکوالاستیک (محور عمودی) بر حسب دما (پلی متیل متا کریلیت، (PMM). (الف) برای يك واحد تغییر شکل در دمای معین؛ هر چه زمان بیشتر باشد تنش کمتری لازم است در دمای شیشه ای کاهش قابل ملاحظه ای در مدول، M_{ve} ، به وجود می آید؛ (ب) هر چه آهسته تر سرد شود دمای شیشه ای کمتر است، زیرا زمان بیشتر به مولکولها امکان می دهد که خود را با افزایش تنش تطبیق دهند.

* با نام تجاری Lucite. ترکیب آن در جدول ۷-۲-۱ آمده است.

دو منحنی شکل ۷-۵-۴ (الف) نشان می‌دهند که با افزایش زمان از ۳۶ ثانیه (۱٪ ساعت) تا ۱ ساعت تنش لازم برای تغییر شکل معین کمتر خواهد بود. این دو منحنی همچنین نشان می‌دهند که با افزایش زمان از ۱٪ تا ۱ ساعت، دمای شیشه‌ای تقریباً 10°C کاهش می‌یابد. این تغییر در شکل ۷-۵-۴ (ب) به صورت تغییر در دمای انتقال شیشه‌ای ناشی از سرد کردن آهسته‌تر منعکس شده است. اگر سرعت سرد کردن کمتر باشد مولکولها فرصت بیشتری برای نوآرایی خواهند داشت و تا دمای پایین‌تر این کار را ادامه خواهند داد. ساختارهای مولکولی مختلف و اثر آنها را روی تغییر شکل می‌توان با هم مقایسه کرد. در شکل ۷-۵-۵ محور عمودی، مدول دیسکوالاستیک (M_{ve}) را نشان می‌دهد.

$$M_{ve} = \frac{\tau}{\gamma_e + \gamma_f} \quad (1-5-7)$$

در اینجا نیز مانند فصل ۶، τ تنش برشی، γ تغییر شکل برشی، γ_e تغییر شکل کشسان و γ_f تغییر مکان به وسیله جریان و پسکوز است. محور افقی تعمیم داده شده است، به طوری که انتهای راست آن، دمای بیشتر و یا زمان طولانیتر را نشان می‌دهد که هر دو تغییر شکل را زیاد می‌کنند (و در نتیجه M_{ve} را کم می‌کنند). در انتهای چپ شکل ۷-۵-۵ (الف) و زیر دما شیشه‌ای T_g که تنها تغییر شکل کشسان میسر است ماده نسبتاً صلب است، نمونه آن گونیایی است که برای نقشه کشی به کار می‌رود. در گستره دمای شیشه‌ای ماده چرم مانند است در این حسابات قابل تغییر شکل و حتی نساکردن است ولی بلافاصله به شکل اولیه بر نمی‌گردد، در ناحیه لاستیکی تغییر شکل پلی‌مرها به راحتی اتفاق می‌افتد ولی بعد از برداشتن تنش پلاستیک سریعاً به شکل قبلی برمی‌گردند توپ لاستیکی و بطری پلی‌اتیلنی فشاری مثالی عالی از این رفتارند زیرا هم نرم و هم بسیار کشسان اند. در دماهای باز هم بالاتر یا تحت بارهای مداوم، جریان دیسکوز تغییر شکل زیادی در پلی‌مر ایجاد می‌کند. قسمت دوم شکل ۷-۵-۵ چگونگی تغییر شکل را همانگونه که برای پلی‌مر بی شکل بیان شد، برای ساختارهای مختلفی که قبلاً ذکر شد مقایسه می‌کند. مواد پلی‌مری کاملاً بلورین (منحنی ۲) دمای شیشه‌ای ندارند، در نتیجه با افزایش دما به تدریج نرم می‌شوند. تا در حوالی نقطه ذوب که جریان سیال اهمیت می‌یابد. پلی‌اتیلنهایی که چگالی بیشتری دارند (جدول ۷-۳-۱) بین منحنیهای (۱) و (۲) واقع می‌شوند زیرا تقریباً ۵۰٪ بلورینگی دارند.

منحنی (۳) شکل ۷-۵-۵ رفتار پلی‌مرهایی را نشان می‌دهد که اتصال متقاطع دارند. مثلاً لاستیک وولکانیزه سخت‌تر از غیر وولکانیزه است. هرچه کسر بیشتری از اتصالات متقاطع ممکن، به هم متصل شوند منحنی (۳) بالاتر خواهد رفت. شایان توجه است که اثر اتصال متقاطع تا بعد از نقطه ذوب در مایع واقعی وجود دارد. در این مورد پلی‌مر مشکی مانند فتل-فرم آلدئید (شکل ۷-۴-۲) را می‌توان به عنوان ماده‌ای که اتصالات متقاطع بسیار زیادی دارد بشمار آورد و گرماسخت بسودن آن را ناشی از ساختار

به تدریج هریک به وسیله دیگری جریان خواهند یافت. سرعت کاهش تنش $(-ds/dt)$ با تراز تنش متناسب است

$$\left(-\frac{ds}{dt}\right)\tau = s \quad (۷-۵-۲)$$

پس از جا به جایی و انتگرال گیری

$$\frac{ds}{s} = -\frac{dt}{\tau} \quad (۷-۵-۳، الف)$$

$$\ln \frac{s}{s_0} = -\frac{t}{\tau}$$

$$s = s_0 e^{-t/\tau} \quad (۷-۵-۳، ب)$$

نسبت تنش، s/s_0 بین تنش در زمان t و تنش اولیه s_0 در t است. ثابت تناسب τ در رابطه $(۷-۵-۲)$ باید واحد زمان داشته باشد و زمان افت نسام دارد، وقتی $t = \tau$ باشد $s/s_0 = 1/e = ۰.۳۷$ خواهد بود.

چون افت تنش نتیجه حرکات مولکولی است می توان گفت که اثر دما روی آن شبیه اثر دما روی نفوذ است. از آنجا که زمان افت عکس سرعت است

$$\frac{1}{\tau} \propto e^{-E/kT} \quad (۷-۵-۴)$$

یا مانند رابطه $(۴-۷-۴)$

$$\ln \frac{1}{\tau} = \ln \frac{1}{\tau_0} - \frac{E}{(1.378 \times 10^{-24} \text{ J/K})(T)} \quad (۷-۵-۵)$$

در این رابطه ها E ، k و T همان معانی و واحدهای رابطه $(۴-۷-۴)$ را دارند. $1/\tau$ ، مثل D در واحد خود sec^{-1} دارد، زیرا هر دو سرعت را در بر می گیرند.

مثال ۷-۵-۱ نمونه ای از جهت گیری مولکولهای لاستیک را به وسیله تغییر دما بیان کنید.

جواب: این آزمایش ساده را می توانید با نوار ضخیم و شکل پذیر لاستیکی انجام دهید. از لب خود می توانید به عنوان نوعی دماسنج استفاده کنید. نوار لاستیکی را با لب پایینی خود در تماس قرار دهید و سریعاً آن را بکشید، سپس به سرعت (بدون رها کردن) آن را به طول اولیه اش برگردانید. این عمل را چند بار تکرار کنید. با کمی دقت متوجه خواهید شد که هنگام کشیدن دما زیاد و به محض آزاد کردن کم می شود. تغییرات دما به این دلیل است که هنگام تغییر جهت گیری مولکولها، گرمای ذوب آزاد شده از لاستیک به لب

شما منتقل می‌شود، و هنگام برداشتن تنش که جهنگیری مولکولها به هم می‌خورد انرژی به صورت آنتروپی جذب می‌شود.

□ مثال ۷-۵-۲ تنش ۱۱ MPa لازم است تا طول يك نوار لاستیکی ۱۰۰ میلی‌متری به ۱۴۰ میلی‌متر برسد. پس از ۲۲ روز در دمای 20°C در همان شرایط کشیده شده، لاستیک فقط تنشی برابر با ۵۵ MPa اعمال می‌کند. الف) زمان افت چقدر است؟ ب) پس از ۹۰ روز و تحت همان شرایط چه تنشی به وسیله نوار اعمال خواهد شد؟
حل: الف) از رابطه (۷-۵-۳، الف)

$$\ln \frac{55}{11} = -\frac{42}{\tau}$$

$$\tau = 61 \text{ روز}$$

ب) از رابطه (۷-۵-۳، ب)

$$s_{90} = 11e^{-90/61}$$

$$= 2.5 \text{ MPa (یا } 360 \text{ psi)}$$

راه حل دیگر قسمت (ب)، با ۴۸ روز اضافی

▲ $s_{48} = 55e^{-48/61} = 2.5 \text{ MPa}$

□ ۷-۵-۳ در مثال ۷-۵-۲، زمان افت برای نوار لاستیکی در 25°C برابر با ۵۰ روز است. پس از ۳۸ روز در 30°C نسبت تنش، s/s_0 چقدر خواهد بود؟

حل: در 25°C ، زمان افت $\tau = 61$ روز است. با استفاده از رابطه (۷-۵-۲) داریم
در 25°C

$$\ln \frac{1}{\tau_0} = \ln \frac{1}{61} + \frac{E}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/K})(293 \text{ K})}$$

در 25°C

$$\ln \frac{1}{\tau_0} = \ln \frac{1}{50} + \frac{E}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/K})(298 \text{ K})}$$

از حل این دو رابطه داریم

$$E = 4.8 \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$\ln \frac{1}{\tau_0} = 7.76$$

در ۳۰°C

$$\ln \frac{1}{\tau} = \frac{7776 - 478 \times 10^{-20} \text{ J}}{(1378 \times 10^{-24} \text{ J/K})(303 \text{ K})}$$

$$\tau = 41 \text{ روز}$$

$$S_{38} = S_0 e^{-38/41}$$

$$S_{38}/S_0 = 0.4$$

توضیح. زمان افت در دماهای بالا کم می‌شود.

لاستیک وقتی تحت تنش است بیشتر در معرض اکسایش قرار دارد. در این حالت ساختار اصلاح می‌شود و تغییرات دیگری مانند سخت شدن یا ترک خوردن مشاهده می‌شود.

۷-۶ رفتار الکتریکی پلی‌مرها

پلی‌مرها غالباً به عنوان عایق الکتریکی به کار می‌روند، و مزیت‌های آشکاری دارند، آنها می‌توانند صلب یا خمش پذیر باشند. می‌توان آنها را به صورت فیلم نازکی درآورد، و حتی به صورت مایع به کاربرد و در محل پلی‌مری می‌شوند مثلاً دور یک سیم الکتریکی. یا به عنوان ترکیب پوششی پس از سوار کردن دستگاه. نکته مهم این است که پیوندهای کووالانس در تمام پلی‌مرها معمولاً رسانش الکتریکی را محدود می‌کنند.

□ رسانش. با آنکه پلی‌مرها ذاتاً عایق‌اند، ترکیب آنها را می‌توان چنان تنظیم کرد که مقداری رسانندگی داشته باشند. در لاستیک‌های ویژه‌ای با افزودن گرد ریز گرافیت که مسیری برای حرکت الکترون‌ها فراهم می‌آورد رسانندگی به وجود می‌آید. بنابراین این رسانندگی از ساختار پلی‌مر نیست بلکه به دلیل وجود ذرات هادی فاز ثانویه‌ای حاصل شده است. همچنین طبیعت سیگنال‌های الکتریکی را از قرار معلوم به وسیله رسانندگی در سلول‌های عصبی که البته ساختار مولکولی دارند، تولید می‌کند. می‌توان از الکترون‌های آزادی صحبت کرد که در چنین مسیرهای مولکولی در سلول‌های عصبی حرکت می‌کنند. با این حال هنوز دانشمندان مکانیسم آن را تا حدی تحلیل نکرده‌اند که بتوانند به طور مصنوعی آن را به وجود آورند و این در مهندسی و علم مواد تحت مطالعه است.

ثابت دی‌الکتریک. پلی‌مرها دارای بار الکتریکی، به صورت هسته‌اتم، الکترون، و گروه‌های قطبی‌اند. این بارها به میدان الکتریکی پاسخ می‌دهند و با آنکه نمی‌توانند مولکول مادر خود را ترک کنند ولی مراکز حرکت خود را به اندازه d به سمت جهت مثبت میدان الکتریکی تغییر مکان می‌دهند. پروتون‌های اتم‌های هیدروژن نیز مرکز ارتعاش خود را به طرف الکترون

منفی انتقال می‌دهند. گروه‌های قطبی (بخش ۷-۳) و مولکول‌های قطبی (بخش ۲-۴) یا میدان‌هم‌امتداد می‌شوند. بنابراین ثابت دی‌الکتریک نسبی، κ ، پلاستیک‌ها بزرگتر از واحد است (جدول ۷-۶-۱).

جابه‌جا شدن بارهای، Q ، به این ترتیب، موجب «قطبش» \mathcal{P} ماده می‌شود. قطبش \mathcal{P} عبارت از مجموع گشتاورهای دوقطبی، $\sum Qd$ در واحد حجم است

$$\mathcal{P} = \frac{\sum Qd}{V} \quad (1-6-7)$$

مقدار قطبش که به‌ساختار ماده بستگی دارد روی چگالی باد، \mathcal{D} ، ($\text{cm}^3/\text{کولن}$) که یک خازن می‌تواند ذخیره کند اثر دارد. بنا بر این در شکل ۱-۲-۱ (الف) هنگامی که بین صفحات خازن خلا باشد بار \mathcal{D} در آن ذخیره می‌شود که با میدان الکتریکی \mathcal{E} متناسب است (رابطه ۱-۲-۵). در صورتی که بین صفحات ماده‌ای وجود داشته باشد، چگالی بار به \mathcal{D}_m

جدول ۷-۶-۱ ثابت دی‌الکتریک نسبی برای پلی‌مرها (دما، در غیر از مواد ذکر شده، 20°C است).

در 10^6 Hz	در 60 Hz	
۳۲۵	۲۲۵	نایلون ۶/۶
۲۲۳	۲۲۳	پلی اتیلن، PE
۲۲۱	۲۲۱	پلی تترافلوئورواتیلن، PTFE
۲۲۵	۲۲۵	پلی استیرن، PS
		پلی وینیل کلرید
۳۲۴	۷۲۵	پلاستیکی شده $(T_g \approx 0^\circ\text{C})^{**}$
۳۲۴	۳۲۴	صلب $(T_g \approx 85^\circ\text{C})$
		لاستیک $(T_g \approx 0^\circ\text{C}, 12 \text{ W/O S})$
۲۲۶	۲۲۶	-25°C
۲۲۷	۴۲۵	$+25^\circ\text{C}$
۳۲۲	۳۲۸	$+50^\circ\text{C}$

* Hz = چرخه در ثانیه.

** T_g = دمای شیشه‌ای.

$(\kappa \mathcal{D}_0 =)$ افزایش می‌یابد. این چگالی بار افزوده شده، راه‌دومی برای تعریف قطبش \mathcal{P} يك ماده است

$$\mathcal{P} = \mathcal{D}_m - \mathcal{D}_0 \quad (۷-۶-۲)$$

یا، با استفاده از روابط (۱-۴-۵) و (۱-۴-۶)

$$\mathcal{P} = (\kappa - 1) \epsilon_0 \mathcal{E} \quad (۷-۶-۳)$$

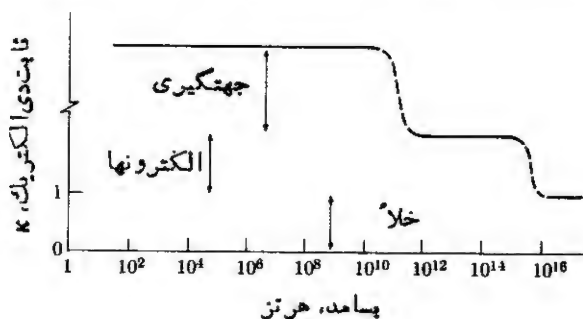
که در آن κ ثابت دی‌الکتریک نسبی و ϵ_0 برابر با $8.85 \times 10^{-12} \text{ C/V} \cdot \text{m}$ است؛ ثابت تناسب، نفوذپذیری فضای آزاد نامیده می‌شود. میدان الکتریکی \mathcal{E} گرادیان ولتاژ، E/d است.

در گستره بسامدهای 10^{12} تا 10^{15} هرتز، قطبش \mathcal{P} تنها به دلیل جابجاشدن الکترونهاست زیرا فقط الکترونها می‌توانند به میدان الکتریکی \mathcal{E} سریعاً پاسخ بدهند، در بسامدهای کمتر، 10^{10} Hz ، در ماده‌ای مانند نایلون، ابتدا از سوی پروتونهای اتمهای هیدروژن طرفین

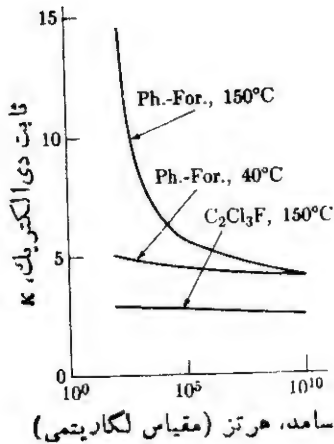
و بعد از گروه قطبی $C=O$ پاسخهایی دیده می‌شود. دوقطبی اخیر در این میدان جهتگیری

می‌کند. زیرا اکسیژن بار منفی اضافی را به صورت جفت الکترونها تنها حمل می‌کند. هم پروتونها و هم اکسیژنها برای جهتگیری دوقطبی به تحرك آنها در داخل ماده احتیاج دارند. البته فقط بالای دمای شیشه‌ای، T_g ، این عمل صورت می‌گیرد. شکل ۷-۶-۱ طرحواره اثر قطبش \mathcal{P} را بر ثابت دی‌الکتریک نسبی κ به صورت تابعی از بسامد نشان می‌دهد. شکل ۷-۶-۲ داده‌های مربوط به دو جامد آلی معمولی را نشان می‌دهد.

زیر T_g ، حرکت مولکولی به ثابت دی‌الکتریک مربوط نمی‌شود. به محض افزایش T_g ، ثابت دی‌الکتریک طبق شکل ۷-۶-۳ ناخداً قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. ولی در دماهای



شکل ۷-۶-۱ ثابت دی‌الکتریک نسبی بر حسب بسامد (طرحواره).
الکترونها در بسامدهای کمتر از 10^{15} هرتز و دو قطبیهای مولکولی در کمتر از 10^{10} هرتز می‌توانند به میدان الکتریکی متناوب پاسخ دهند.

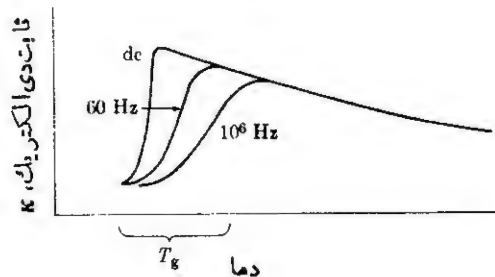


شکل ۷-۶-۲ ثابت دی الکتریک بر حسب بسامد. به طور کلی بسامد بالاتر و دمای پایینتر موجب کاهش ثابت دی الکتریک می شود زیرا زمان برای ردیف شدن دو قطبها کافی نخواهد بود. (Ph-For) فنل فرم آلدئید، C_6Cl_3F پلی تری کلروفلوئورو اتیلن).

بالاتر کاهشی در ثابت دی الکتریک مشاهده می شود، زیرا آشفته گیهای شدیدتر گرمایی جهت گیری دو قطبهای مولکولی را از بین می برند.

منحنیهای شکل ۷-۶-۳ نقاط دیگری را نیز نشان می دهند. دمای شیشه ای T_g با بسامد تغییر می کند. درست مانند شکل ۷-۵-۴ زمان زیاد (در این مورد چند میلی ثانیه برای ۶۰ Hz در مقابل چند میکروثانیه برای ۱۰^۶ Hz) موجب حرکت مولکولی در همین دمای پایین می شود. میدان dc حتی T_g کمتری دارد زیرا برای جهت گیری مولکولی زمان زیادی در دسترس است.

مثال ۷-۶-۱ پلی استیرن وقتی در میدان dc قرار می گیرد دارای ثابت دی الکتریک نسبی



شکل ۷-۶-۳ ثابت دی الکتریک بر حسب دما. پایینتر از دمای شیشه ای T_g ، دو قطبهای مولکولی نمی توانند به میدان الکتریکی متناوب پاسخ دهند (دمای شیشه ای در بسامدهای پایین کمتر است) [شکل ۷-۵-۴ (ب)]. بالای T_g آشفته گی گرمایی قطبش را از بین می برد و ثابت دی الکتریک، κ ، را کاهش می دهد.

۲۵ است. قطبش درون PS را وقتی که ورق ۵ دره میلی متری بین ۱۰۰ ولت قرار می گیرد حساب کنید.

حل: میدان $2 \times 10^5 \text{ V/m}$ است. از رابطه (۷-۶-۳)

$$\Phi = (2.5 - 1)(8.85 \times 10^{-12} \text{ C/V} \cdot \text{m})(2 \times 10^5 \text{ V/m})$$

$$= 2.77 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$$

توضیح. از آنجا که بار الکترون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ است، این قطبش معادل $1.77 \times 10^2 \text{ el/mm}^2$ است. ▲

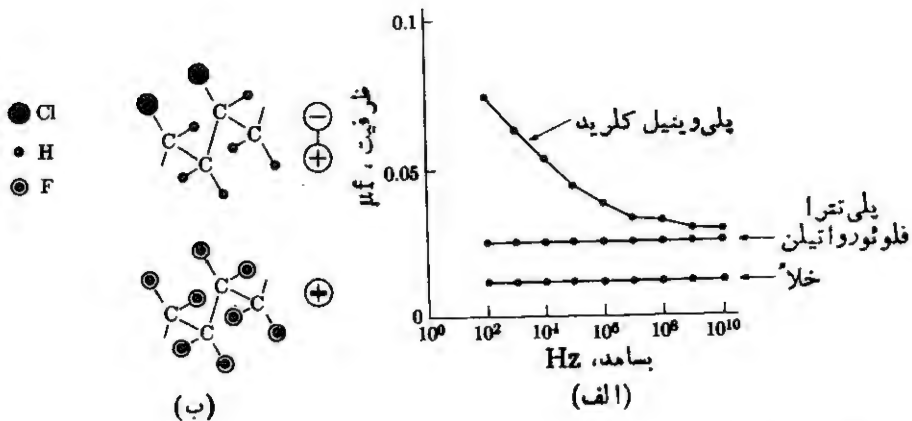
مثال ۷-۶-۲ ظرفیت خازنی با صفحات موازی را می توان از رابطه (۷-۲-۱) محاسبه کرد. ثابت دی الکتریک نسبی برای پلی وینیل کلرید (PVC) و پلی تترافلورو اتیلن (PTFE) به قرار زیر است

PTFE	PVC	بسامد، هرتر
۲۱	۶۵	۱۰۲
۲۱	۵۶	۱۰۳
۲۱	۴۷	۱۰۴
۲۱	۳۹	۱۰۵
۲۱	۳۳	۱۰۶
۲۱	۲۹	۱۰۷
۲۱	۲۸	۱۰۸
۲۱	۲۶	۱۰۹
۲۱	۲۶	۱۰۱۰

الف) ظرفیت را بر حسب بسامد برای سه خازن با صفحاتی که مساحت مؤثر آنها $102 \text{ cm} \times 31 \text{ cm}$ است و به فاصله 25 mm از یکدیگر قرار دارند برای (۱) خلا؛ (۲) PVC؛ و (۳) PTFE رسم کنید.

ب) کاهش ثابت دی الکتریک PVC و ثابت ماندن ثابت دی الکتریک PTFE را نسبت به افزایش بسامد توضیح دهید.

حل: الف) محاسبه نمونه برای 102 چرخه بر ثانیه



شکل ۷-۶-۴ ظرفیت بر حسب بسامد. الف) به مثال ۷-۶-۲ مراجعه کنید؛ ب) تقارن مرهای پلی وینیل کلرید و پلی تترافلورو اتیلن.

$$C_{vac} = \frac{(1)(8.85 \times 10^{-12} \text{ C/V} \cdot \text{m})(0.031 \text{ m})(1.02 \text{ m})}{25 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.0112 \mu\text{f}$$

$$C_{pvc} = (65)(0.0112 \mu\text{f}) = 0.073 \mu\text{f}$$

بقیه نتایج در شکل ۷-۶-۴ الف) دیده می شود.

ب) ثابت دی الکتریک نسبی PVC در بسامدهای پایین زیاد است زیرا PVC دارای مری نامتقارن با گشتاور دوقطبی زیاد است. [شکل ۷-۶-۴ ب)]. در بسامدهای بالا دوقطبیها نمی توانند در میدان متناوب ردیف شده باقی بمانند. از طرف دیگر PTFE مرتقارنی دارد، و قطبش آن تنها الکترونی است. با آنکه دوقطبیها در PTFE ضعیفترند ولی در بسامدهای مختلف شکل ۷-۶-۴ می توانند نوسان کنند.

□ ۷-۷ پایداری پلی مرها

پلی مرها به وسیله تغییر شکل و یسکوالاستیک تغییر شکل می یابند (بخش ۷-۵). اگرچه تغییر شکل با افزایش دما در بالای T_g شتاب پیدا می کند، این نرم شدن، پیوندهای کووالانسی اولیتمولکول را نمی شکند. اگرچه تحت شرایط شدیدتری، این پیوندها ممکن است شکسته شوند. البته هر تغییری که در ساختار به وجود آید بر خواص آن تأثیر می کند. گرمای زیاد می تواند پیوندها را بشکند و موجب تجزیه پلی مر شود. محیطهای اکسید کننده باعث تغییرات شیمیایی می شوند. سرانجام تشعشع موجب تجزیه و در برخی شرایط موجب شاخه ای شدن یا اتصال مقاطع می شود.

تجزیه شدن. معمولیترین نوع تجزیه در پلی مرها، زغال شدن آنهاست. اگر رادیکالهای طرفین و اتمهای هیدروژن يك پلی مروینیل (جدول ۷-۲-۱) به وسیله آشفته گری گرمایی واقعاً جدا شوند فقط ستون اتمهای کربن باقی می ماند. این موضوع را می توان در کربوهیدراتهای نان برشته شده یا در چوب زغال شده ملاحظه کرد. در محصولات تجارتي معمولاً باید از چنین اتفاقی اجتناب شود.* این کربنی شدن در مجاورت هوا تسريع می شود، زیرا اکسیژن هوا با اتمهای هیدروژن در طول زنجیر پلی مر ترکیب می شود.

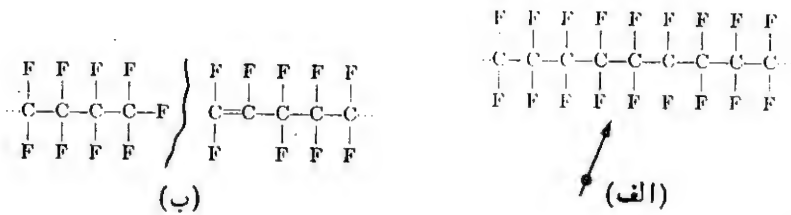
اکسایش. اکسیژن علاوه بر آنکه تجزیه شدن را تسريع می کند اثرات دیگری نیز دارد. مثلاً برخی لاستیکها با گوگرد تنها ۵ تا ۲۰ درصد از اتصالات متقاطع ممکن را تشکیل می دهند و در نتیجه لاستیک تغییر شکل پذیر و کشان باقی می ماند. در يك دوره از زمان، لاستیک ممکن است به کمک اکسیژن هوا اتصالات متقاطع بیشتری تشکیل دهد. حاصل این عمل شبیه به شکل ۷-۴-۴ است. با این فرق که اکسیژن به جای گوگرد برقرار کننده اتصال است. معمولاً با افزایش تعداد اتصالات متقاطع لاستیک سخت تر و شکل پذیری آن نیز کمتر می شود.

واکنش اکسیدشدنی را که ذکر شد چند عامل تسريع می کند:

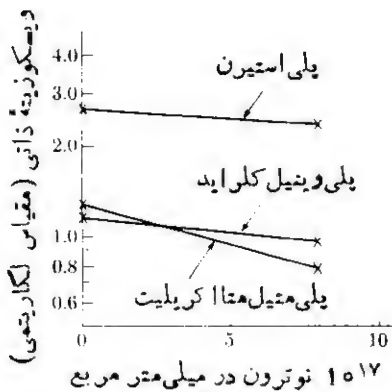
۱. اکسیژن اگر به صورت ازن، O_3 ، باشد به مراتب فعالتر از O_2 است.
 ۲. تابش نور فرابنفش می تواند انرژی لازم برای شکستن پیوندهای موجود را فراهم کند و موجب پیشرفت واکنش اکسایش شود.
 ۳. پیوندهای موجود در مولکولی که تحت تنش باشد آسانتر شکسته می شوند.
- به این دلایل است که در ساختن تایر ماشین غالباً مقداری دوده سیاه یا مواد مشابه دیگری که نور را جذب می کنند به کار می رود تا سرعت اکسایش در محصول کاهش یابد. بر اساس همین اصول هنگام آزمایش کردن پایداری محصولات، برای تسريع در کار، آنها را در مجاورت ازن یا نور فرابنفش قرار می دهند.

تجزیه تشعشعی. تابش نور فرابنفش به صورتی که ذکر شد و به وسیله نوترون، به آسانی پیوند $C-C$ را در پلی مر نوع وینیل می شکند (شکل ۷-۷-۱) این عمل که مولکولهای کوچکتری تولید می کند، تجزیه تشعشعی نام دارد و خواصی چون استحکام، ویسکوزیته، و غیره را تحت تأثیر قرار می دهد. شکل ۷-۷-۲ نشان می دهد که ویسکوزیته ذاتی پلی مر ذوب شده هنگامی که به ملایمت در معرض mm^2 نوترون $10^{12} \times 8$ قرار می گیرد کاهش می یابد.

* در برخی شرایط کنترل شده، الیاف گرافیتی ممکن است از الیاف پلی مری حاصل شوند و در این صورت مواد چندسازه برای استفاده در دمای بالا تقویت می شوند.



شکل ۷-۷-۱ تجزیه شدن به وسیله تشعشع (تجزیه تشعشی پلی تترافلورو اتیلن). اکثر پلی مرها به این روش عمل می کنند نه مانند شکل ۷-۷-۳. در نتیجه بیشتر پلی مرها در اثر صدمات ناشی از تشعشع، استحکام خود را از دست می دهند.



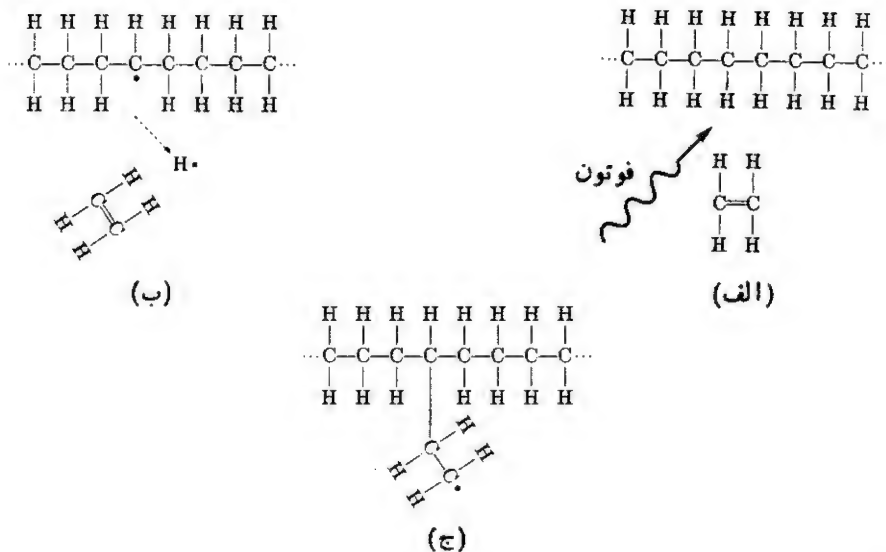
شکل ۷-۷-۲ تجزیه به وسیله قرار گرفتن در معرض نوترون. چون پلی مرها به مولکولهای کوچکتری شکسته شده اند، ویسکوزیته آنها کاهش یافته است.

در بعضی حالات (مثلا پلی اتیلن) تشعشع موجب شاخه ای شدن می شود. اگر این عمل قبل از تکمیل پلی مر شدن به وقوع پیوندد، ساختاری مانند شکل های ۷-۲-۵ و ۷-۲-۳ حاصل خواهد شد. نتیجه کار روی خواص اثر بسیار مهمی دارد و این در مورد دو جفت بطری فشاری در شکل ۷-۲-۲ دیده می شود. این امر که آیا تشعشع آثار مطلوب شکل ۷-۲-۲ را دارد یا مانند شکل ۷-۲-۱ زیان آور است به سادگی قابل پیش بینی نیست.

مثال ۷-۷-۱ لاستیک ایزوپرن تا ۱۰٪ با گوگرد اتصال متقاطع یافته است و در حین کار در محیط اکسید کننده اتصال متقاطع بیشتری با اکسیژن پیدا می کند. در این حالت ۲٪ به وزن آن افزوده می شود. چند درصد از اتصال متقاطع ممکن صورت گرفته است؟

حل: مبنا: ۶۸ g ایزوپرن (= ۱ مول)؛ بنابراین ۳۲ گرم گوگرد در ۱۰۰٪.

$$۳۲ g = (۳۲ g) \times ۰.۰۲ = \text{مقدار گوگرد}$$



شکل ۳-۷-۷ شاخه‌ای شدن به وسیله تشعشع در حین پلی مری شدن. فوتون می‌تواند انرژی فعالساز لازم برای شاخه‌ای شدن را تأمین کند. نوترون نیز می‌تواند همین اثر را داشته باشد.

$$۱۲۲۲ \text{ g} = ۶۸ + ۳۲۲ \text{ g} = ۴۰۰ \text{ g} = \text{اکسیژن گرفته شده}$$

$$\text{مول} = ۰۰۹ = (۱۲۲۲) / (۱۶ \text{ g}) = \text{مول اکسیژن}$$

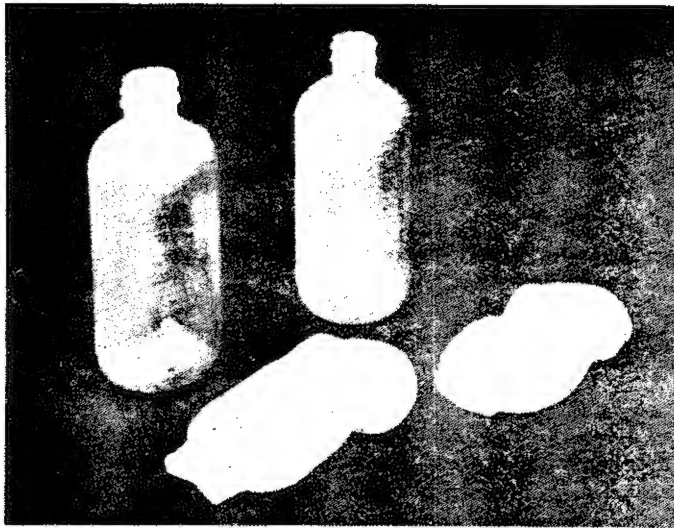
$$۰۰۹ = (\text{مول ایزوپرن}) / (\text{مول} = ۰۰۹) \text{ (یا \%۹ از اتصالات ممکن)}$$

$$۱۹ = (\text{توسط O}) + (\text{توسط S}) = ۱۰ \% = (\text{کل اتصالات متقاطع})$$

مثال ۳-۷-۷ فرض کنید تمام انرژی لازم برای جدا کردن اتمهای هیدروژن در شکل ۳-۷-۷ به وسیله فوتون تأمین شود (و انرژی گرمایی به کار نیاید). (الف) بیشینه طول موجی که می‌توان به کاربرد چقدر است؟ (ب) چند eV تولید می‌شود؟

حل: (الف) از جدول ۲-۳-۱

$$\begin{aligned} \text{C-H} &= \frac{۲۳۵۰۰۰ \text{ J}}{۰۰۶ \times ۱۰^{۲۴} \text{ پیوند}} \\ &= \frac{۰۷۲۵ \times ۱۰^{-۱۸} \text{ J}}{\text{پیوند}} \end{aligned}$$



شکل ۷-۷-۴ تحت تابش قرار گرفتن پلی اتیلن. هر چهار بطری فشاری به مدت ۲۰ دقیقه در 120°C (250°F) گرم شده اند، ولی قبل از آن، دو بطری پشتی تحت اثر اشعه گاما قرار گرفته بودند تا شاخه ای شدن به وجود آید (شکل ۷-۷-۳). بطریهای له شده تحت اشعه گاما قرار نکرده بودند. تشعشع زیادی نیز ممکن است اثر عکس داشته باشد و تجزیه تشعشعی ایجاد کند (شکل ۷-۷-۱). اخیراً پلی اتیلن با چگالی زیاد (HDPE) را چنان ساخته اند که برای ضد عفونی، در برابر آب جوش نیز دوام داشته باشد (جدول ۷-۳-۱).

از رابطه (۲-۲-۱)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{(6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec})(3 \times 10^8 \text{ m/sec})}{0.725 \times 10^{-18} \text{ J}}$$

$$= 2.74 \times 10^{-7} \text{ m} = 274 \text{ nm}$$

$$eV = (0.725 \times 10^{-18} \text{ J/پیوند})(6.24 \times 10^{18} \text{ eV/J}) \quad (\text{ب})$$

$$= 4.5 \text{ eV/پیوند}$$

توضیح. این طول موج در ناحیه فرابنفش است. طول موجهای کمتر از آن فوتونهای پرانرژیتری تولید می کنند که البته باز هم پیوندها را می شکنند.

مرور و بررسی مطالب

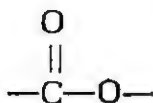
پلاستیکها جامداتی مولکولی اند که پلیمر نامیده می‌شوند و بنابراین پیوند شیمیایی ذکر شده در بخش ۲-۳ اساس ساختار آنها را تشکیل می‌دهد. خواص و رفتار پلاستیکها به پاسخ مولکولها در مقابل شرایط گرمایی، مکانیکی و الکتریکی بستگی دارد.

خلاصه: ساختارهای مولکولی

مولکولها در پلیمرها بسیار بزرگ‌اند، هر کدام از آنها واحدهای زیادی دارند و هر واحد، یا مر، آرایش اتمی موجود در کل ساختار مولکولی را دارد. این مرها در سراسر مولکول پلیمری تکرار می‌شوند. چون تمام مولکولها مشابه نیستند برای مشخص کردن پلیمر، میانگین اندازه‌های مولکولی را محاسبه می‌کنیم. این میانگین می‌تواند براساس جرم مولکولها یا براساس تعداد مولکولها باشد.



گروه بزرگی از پلیمرهای نوع افزایشی اند که بدون تولید محصول فرعی ایجاد می‌شوند. **R** می‌تواند هر کدام از رادیکالهای جنبی باشد. معمولیترین گروه از پلیمرهای نوع تغلیظی، پلی استرها اند که حین واکنش پلیمر شدن مولکول فرعی کوچکی مانند آب و اتصالات



تولید می‌کنند. اگر مولکولها دو تا یکی باشند، هر دو گروه فوق پلیمرهای خطی ایجاد خواهند کرد. مونومرهای چندتابعی (یعنی مولکولهای کوچکی که می‌توانند به سه یا چند مولکول دیگر متصل شوند) پلیمر مشبك به وجود می‌آورند.

کوپلیمر در مولکول خود بیش از یک نوع مر دارد. تغییرات ساختاری آن شامل ایزومرهای فضایی (تک آرایش، بی آرایش) و اصلاحات سپس و ترانس در لاستیک است این آرایشها به اضافه تمایل مولکولها برای گره خوردگی به وسیله آشفنگی گرمایی، مانع از تبلور می‌شود.

خلاصه: رفتار مولکولی

رفتار مولکولها، بخصوص مولکولهای بزرگ (ماکرومولکولها) با رفتار اتمهای فلزی متفاوت است. عمده ترین مسئله آن است که بسیاری از جامدات ماکرومولکولی ساختار مایعات فوق سرد شده را دارند و بی شکل اند. در بهترین حالت بلورهای با عیوب بسیار

ایجاد می کنند. ولی مایع فوق سرد شده دمای انتقالی دارد که به دمای شیشه ای T_g معروف است. پائینتر از T_g از نو آرای جلو گیری می شود، بالای T_g مولکولهای می توانند به تنشهای مکانیکی و نیروهای میدانهای الکتریکی پاسخ بدهند. پائینتر از T_g پلاستیک صلب و ترد است و ثابت دی الکتریک پائینی دارد. بالاتر از T_g پلاستیک خمش پذیر است و در دمای بالا و زمان کافی به آسانی تغییر شکل می یابد. به این دلیل تولید آن آسان است، از طرفی هنگام استفاده، محدودیتهایی از نظر محیطی دارد، با افزایش T_g ثابت دی الکتریک زیاد می شود زیرا گروههای قطبی برای پاسخ دادن به میدانهای الکتریکی آزادترند. پلی مرهای خطی گرما نرم اند و در دماهای بالاتر از T_g به صورت مایع ویسکوز تغییر شکل می یابند. پلی مرهای مشبك به دما حساسیت کمتری دارند و اگر در دماهای بالا، پلی مر شدن، اتصال مقاطع، یا شاخه ای شدن در آنها ادامه پیدا کند محکمتر خواهند شد. پلی مرها ممکن است به وسیله آشفته گی گرمایی زیاد، اکسایش و قرار گرفتن در معرض اشعه از هم پاشیده شوند.

سؤالات تشریحی

۱. توضیح دهید که چرا همیشه «میانگین تعداد» اندازه مولکولی از «میانگین جرمی» اندازه مولکولی کمتر است.
۲. دودخلال دندان بردارید و آنها را از يك سرمیز تا سردیگر آن طوری بچینید که در هر نقطه اتصال زاویه 120° وجود داشته باشد قبل از گذاشتن هر خلال دندان يك سکه قرار دهید. خلال دندانها را طوری قرار دهید که سر آن در طرف راست و دم آن در طرف چپ قرار گیرد. الف) فاصله دوسر آن چقدر است؟ ب) نتایج بدست آمده با نتایج رابطه (۷-۱-۴) تفاوت دارد چرا؟ (این کار را با کاغذ رسم سه محوری نیز می توان انجام داد.)
۳. چرا مرهای چندتابعی برای مولکولهای مشبك لازم اند؟
۴. ساختار سه مونومر وینیل را رسم کنید. این کار را برای مرهای همین سه پلی مروینیل تکرار کنید.
۵. نشان دهید که در پلی مرشدن افزایشی پروپیلن (CH_2CHCH_3) پیوندها چگونه تغییر می کنند.
۶. نشان دهید که در پلی مرشدن افزایشی بوتادین [$\text{CH}_2(\text{CH}_2)\text{CH}_2$] پیوندها چگونه تغییر می کنند.
۷. پراکسید هیدروژن (H_2O_2) از پلی مرشدن جلو گیری می کند. «دو برابر کردن مقدار آن به مراتب بهتر است.» در این باره شرح دهید.
۸. برای طراحی فرایندهای پلی مرشدن باید به گرماگیری توجه کرد، چرا؟
۹. مقدار گرمای بدست آمده از پلی مرشدن پلی اتیلن، پلی استر، و کوپلی مر ۵۰-۵۰ از این دو، را با هم مقایسه کنید.

۱۰. رابطه ۷-۲-۸ را مجدداً طوری بنویسید که به جای H_2O ، NH_3 محصول فرعی باشد. توضیح دهید که چرا معمولاً H_2O محصول فرعی است و NH_3 نیست.

۱۱. ترکیب چند لاستیک را، بجز آنهایی که در جدول ۷-۲-۲ آمده است، بنویسید.



۱۲. به وسیله شکل نشان دهید که چرا بخش $-C-$ وینیل کلرید گروهی قطبی است.



۱۳. چرا فلزات به ندرت شیشه‌ای اند ولی پلی‌مرهای بی‌شکل معمولاً شیشه‌ای اند؟

۱۴. مولکولهای پلی‌اتیلن «دندان اره‌ای» است، ولی در بلور خود به صورت مستقیم است (شکل ۷-۳-۴). وقتی این ماده در سیکلوهگزان (حلال مایع) حل می‌شود،

صورتنندی گره‌خورده شکل ۷-۱-۷ را دارد. هر دو صورت پایدار است چرا؟

۱۵. شرح دهید که چرا ضریب انبساط گرمایی [شیب منحنی شکل ۷-۵-۴ (ب)]، در بالای T_g بیشتر است از پایینتر از T_g .

۱۶. مقدار دقیق T_g به سرعت سرد شدن بستگی دارد. چرا؟

۱۷. چرا پلی‌وینیل کلرید به ندرت بلوری می‌شود؟

۱۸. کوبلی‌مری از دو وینیل ممکن است تصادفی یا به صورت تجمعی از گروهی مر باشد.

که در طول زنجیر به صورت خوشه‌ای قرار گرفته‌اند (مثلاً $BBAAAAAABB$ -

$BBBBBBBBBA$ - $AAAAAA$). گروه اخیر آسانتر از کوبلی‌مر تصادفی

($BAABABBBABAABAAABABBABAB$ -) بلوری می‌شود. علت آن را

شرح دهید.

۱۹. دمای شیشه‌ای کوبلی‌مر کمتر از دمای شیشه‌ای متوسط دو پلی‌مر تشکیل‌دهنده آن است.

علت آن را شرح دهید.

۲۰. اگر فنل و فرم‌آلدئید پلی‌مر شوند محصول فرعی چه خواهد بود؟ اگر اوره و فرم‌آلدئید

پلی‌مر شوند (شکل ۲-۳-۱) چگونه؟

۲۱. قراضه‌های مواد گرمانرم برای بازگردانی مناسب‌ترند یا مواد گرما سخت؟ چرا؟

۲۲. پیشنهاد شده است که از بوتادین (شکل ۷-۲-۲) برای اتصال مقاطع پلی‌اتیلن

استفاده شود. مزایا و معایب آن را شرح دهید.

۲۳. شرح دهید که چرا لاستیک در دمایی که در آن نیتروژن مایع وجود دارد (۷۷K)

شکسته است.

۲۴. یک بار دیگر با خمیر مجسمه‌سازی که در بچگی داشتید بازی کنید. رفتار آن را شرح

دهید.

۲۵. منحنیهای شکل ۷-۵-۵ (ب) را برای کسی که این درس را نگرفته است شرح دهید.

۲۶. روابط بین مدول و بسکوالاستیک، دمای شیشه‌ای و ثابت دی الکتریک را شرح دهید.

مسائل

۱-۱-۷ پلی مری معمولی، C_7H_7Cl را دارد. (شبيه به پلی وینیل کلرید (شکل ۱-۷-۳) است بجز آنکه هرمر، کلر ثانویه‌ای (ویک هیدروژن کمتر) دارد. هر مولکول دارای میانگین جرمی 60000 amu است. الف) جرم مر آن چقدر است؟ ب) درجه پلی مر شدن آن چقدر است؟

جواب: الف) 97 amu (یا مول/۹۷) ب) ۶۲۰

۲-۱-۷ در هر گرم پلی وینیل کلرید 10^{20} مولکول وجود دارد. الف) میانگین اندازه مولکولی چقدر است؟ ب) درجه پلی مر شدن چقدر است؟

۳-۱-۷ نقطه ذوب، T_m ، پارافینها (C_xH_{2x+2}) ، بر حسب K ، در شکل ۱-۱-۷ گاهی از رابطه تجربی زیر بدست می آید

$$T_m = [0.0024 + 0.017/x]^{-1} \quad (7\text{-مسائل-}1)$$

نقطه ذوب پلی اتیلن در سه حالت زیر چقدر است؟ الف) وقتی درجه پلی مر شدن n ، برابر ۱۰ باشد؟ ب) درجه پلی مر شدن برابر ۱۰۰ باشد؟ ج) درجه پلی مر شدن برابر ۱۰۰۰ باشد؟ (لازم به ذکر است که مر C_2H_4 .)

جواب: الف) $35^\circ C$ ب) $130^\circ C$ ج) $142^\circ C$

۴-۱-۷ دو گرم دکستروز ($C_6H_{12}O_6$) در $14^\circ C$ گرم آب حل می شود. نسبت هر نوع مولکول چقدر است؟

۵-۱-۷ الف) «میانگین جرمی» اندازه مولکولی، در مولکولهای مثال ۲-۱-۷ چقدر است؟ ب) «میانگین عددی» اندازه مولکولی چقدر است؟

جواب: الف) 317 amu ب) 216 amu

۶-۱-۷ برای تعیین میانگین اندازه مولکولی پلی مری، داده های زیر به دست آمده است

جرم	متوسط در يك فاصله
۳۰۰ g	۳۰۰۰۰ amu
۵۰۰	۲۰۰۰۰
۲۰۵	۱۰۰۰۰

«میانگین جرمی» اندازه مولکولی را حساب کنید.

۷-۱-۷ الف) نسبت مولکولها در هر سه دسته اندازه مسئله ۷-۱-۶ چقدر است؟ ب) «میانگین عددی» اندازه مولکولی چقدر است؟

جواب: الف) 17500 amu (ب) $167,00417,00417,00417$

۷-۱-۸ ب) اتیلن حاوی تعداد مساوی مولکول با ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ مر است. میانگین جرمی اندازه مولکولی چقدر است؟

۷-۱-۹ ب) پلی وینیل کلرید $(C_2H_3Cl)_n$ در حلال آلی حل می شود. الف) میانگین مربعات طول مولکولی با جرم مولکولی 28500 g/mole چقدر است؟ ب) با یک دوم میانگین مربعات طول قسمت (الف)، جرم مولکولی چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) 7125 g/mole (ب) 265 nm

۷-۱-۱۰ درجه پلی مرشدن و میانگین مربعات طول مولکول میانگین در مسئله ۷-۱-۸ در صورتی که پلی مرلی وینیل الکل باشد تعیین کنید (میانگین عددی).

۷-۱-۱۱ ماده ای پلی مری حاوی مولکولهای پلی وینیل کلرید است و در هر مولکول به طور متوسط ۹۰۰ مر دارد. اگر هر یک از مولکولها بتوانند بدون گره شوند و به صورت مولکول راست در آیند (بجز در مورد زاویه های پیوند 109.5°) بیشینه کرنشی که این پلی مری تواند داشته باشد چقدر است؟

جواب: 3300% کرنش

۷-۲-۱ در صورتی که ۷ گرم اتیلن پلی مر شده و به صورت پلی اتیلن در آید، با استفاده از داده های فصل ۲، تغییر انرژی خالص آن چقدر است؟

جواب: 15000 J

۷-۲-۲ الف) هنگام پلی مرشدن بوتادین چه تعداد پیوند $C=C$ در هر مر از بین می رود؟ ب) چه تعداد پیوند $C-C$ اضافی تشکیل می شود؟

۷-۲-۳ با مراجعه به مسئله ۷-۲-۲، تعیین کنید که با پلی مرشدن ۷ گرم بوتادین چقدر انرژی آزاد می شود؟

جواب: 7800 J

۷-۲-۴ کوپلی مری حاوی جرمهای مساوی از استیرن و بوتادین است. نسبت مر هر کدام چقدر است؟

۷-۲-۵ کوپلی مر سه تایی، ABC ، دارای کسر مساوی از هر یک از مرهاست. نسبت مر هر یک چقدر است؟

جواب: اکریلونیتریل، ۴ر۵؛ بوتادین، ۴ر۵؛ استیرن، ۲ر۵

۷-۲-۶ اگر هفت گرم از کوپلی مر ABC مسئله ۷-۲-۵ پلی مر شود، چه مقدار انرژی آزاد می شود؟

۷-۲-۷ بامراجع به مثال ۷-۲-۳، تعیین کنید به ازای هر گرم محصول چه مقدار آب به دست می آید.

جواب: ۱۶g ۵

۷-۲-۸ بیا مراجعه به مثال ۷-۲-۳، فرض کنید محصول فرعی واکنش (به جای H_2O) NH_3 باشد. الف) نشان دهید که کدام پیوندها باید شکسته شود؟ ب) مقدار تغییر انرژی به ازای تشکیل هر مول NH_3 چقدر است؟ ج) چرا انتظار وقوع این واکنش نمی رود؟

۷-۲-۹ به 280 kg اتیلن، قبل از پلی مر شدن H_2O_2 افزوده شده است. میانگین درجه پلی مر شدن ۱۵۰۰ به دست آمده است. فرض کنید تمام H_2O_2 برای تشکیل گروه انتهایی مولکولهای پلی مر به کار رفته باشد. چند گرم H_2O_2 اضافه شده است؟ (مر $C_2H_4 =$)

جواب: ۴۰g ۳

۷-۲-۱۰ دو دهم از یک درصد وزنی H_2O_2 قبل از پلی مر شدن به اتیلن اضافه شده است. در صورتی که تمام H_2O_2 به عنوان پایانه برای مولکولها به کار رود میانگین درجه پلی مر شدن چقدر خواهد بود؟ (مر $C_2H_4 =$)

۷-۲-۱۱ نسبت مرهای اتیلن (C_2H_4) به مرهای وینیل کلرید (C_2H_3Cl) در کوپلی مری که از این دو تشکیل شده، در صورتی که درصد وزنی کلر ۳۵ باشد، چقدر است؟

جواب: ۲ به ۱

۷-۲-۱۲ نسبت مرهای استیرن به بوتادین ۱/۳ است. درصد وزنی کربن چقدر است؟

۷-۳-۱ چگالی متان جامد 0.925 g/cm^3 (0.925 Mg/m^3) است. الف) ثابت شبکه بلور آن که fcc است (شکل ۷-۳-۲) چقدر است؟ ب) «شعاع» مولکول CH_4 چقدر است؟

جواب: الف) 0.925 nm ب) 0.206 nm

۷-۳-۲ بد بلوری دارای چگالی 0.925 Mg/m^3 (0.925 g/cm^3) و ساختاری مطابق شکل ۷-۳-۳ است، بعد سوم سلول واحد چقدر است؟

۷-۳-۳ یک پلی اتیلن بدون آنکه بلورینگی داشته باشد، دارای چگالی 0.90 Mg/m^3 است. چگالی اتیلن تجاری کم چگالی (LDPE) 0.92 Mg/m^3 است، در حالی که

چگالی HDPE، 0.96 Mg/m^3 است، کسر حجمی بلورینگی را در هر يك از حالات تخمین بزنید.

جواب: $C_{\text{HDPE}} = 0.18$ ؛ $C_{\text{LDPE}} = 0.55$

۴-۳-۷ با استفاده از مثال ۱-۳-۷ و مسئله ۳-۳-۷، مقدار «فضای آزاد» را در LDPE؛ و در HDPE حساب کنید.

۵-۳-۷ سه تصویر مستطیلی آنها در سلول واحد پلی اتیلن (شکل ۲-۳-۷) را رسم کنید.

۱-۴-۷ در صورتی که از گوگرد به عنوان اتصال مقاطع در نقاطی که امکانپذیر باشد استفاده شود در الف) پلی ایزوپرن و ب) پلی کلروپرن، درصد گوگرد چقدر است؟

جواب: الف) ۳۲٪ گوگرد ب) ۲۶.۵٪ گوگرد

۲-۴-۷ لاستیکی حاوی ۹۱٪ کلروپرن پلی مری شده و ۹٪ گوگرد است چه کسری از اتصالات مقاطع ممکن توسط ولکانش متصل شده اند؟ (فرض کنید که تمام گوگرد برای اتصالات مقاطع، از نوعی که در شکل ۲-۴-۷ دیده می شود، استفاده شود).

۳-۴-۷ لاستیکی حاوی ۵۴٪ بوتادین، ۳۴٪ ایزوپرن، ۹٪ گوگرد، و ۳٪ کربن سیاه است. به فرض آنکه تمام گوگرد در اتصالات مقاطع به کار رود، چه کسری از اتصالات مقاطع توسط ولکانش متصل می شوند؟

جواب: ۰.۱۸۸

۴-۴-۷ لاستیک A (۲۰۰ g) حاوی ۱۶۸ g بوتادین $(C_4H_6)_n$ و ۳۲ g گوگرد است. الف) در صورتی که تمام گوگرد در این اتصالات به کار رود، از چه کسری از اتصالات مقاطع استفاده شده است؟

لاستیک B (۲۱۷ g) حاوی ۱۶۸ g ایزوپرن $(C_5H_8)_n$ و ۴۹ g سلنیم است. اگر چه استفاده از سلنیم مضرات بسیاری دارد، ولی می تواند در لاستیک اتصال مقاطع به وجود آورد. (این عنصر در جدول تناوبی درست زیر گوگرد قرار دارد.) ب) کدامیک از لاستیکهای A و B اتصال مقاطع بیشتری خواهند یافت؟

۵-۴-۷ اگر فنل با فرم آلدئید به صورت سه تایی پلی مری شده و تمام محصول فرعی، آب، تبخیر شود، درصد کاهش وزن چقدر خواهد بود؟

جواب: ۲۱۹٪

۶-۴-۷ شرکت X رزینی از فنل و فرم آلدئید را خریداری کرده است، که به طور جزئی پلی مری شده است. نمونه ای از آن (۱۰۳ g) در قالب گرمی پرس شد. این رزین در ابتدا گرمانرم بود، ولی پس از چند دقیقه سخت شد. پس از آنکه نمونه کاملاً خشک شد،

وزن آن به ۹۰۶ گرم رسید. اگر فرض کنیم که محصول نهایی ۳ پل CH_2 - دارد، تعداد اتصالات CH_2 - را که فنل در ابتدا داشته است معلوم کنید؟

۷-۴-۷ يك كيلو گرم دی‌وینیل بنزن (شکل ۷-۴-۳) به ۵۰ کیلوگرم استیرن افزوده شده است. بیشینه تعداد اتصالات متقاطع در هر گرم محصول چقدر است؟

جواب: $9 \times 10^{19}/\text{g}$

۷-۴-۸ چه مقدار گوگرد باید به ۱۰۰ g لاستیک کلروپرن افزوده شود تا ۱۰٪ از مرهای آن اتصال متقاطع یابد؟ (فرض کنید تمام گوگرد موجود همان‌طور که در شکل (۷-۴-۷) درمورد یوتادین نشان دادیم مورد استفاده قرار گرفته باشد.)

۷-۵-۱ تنش در مدت ۱۲۳ روز از ۷ MPa به ۵ MPa افت کرده است. الف) زمان افت چقدر است؟ ب) چه مدت طول می‌کشد تا به ۳ MPa افت کند؟

جواب: الف) ۳۶۶ روز ب) ۱۸۷ روز بیشتر (مجموعاً ۳۱۰ روز)

□ ۷-۵-۲ برای ایجاد ۵۰٪ کرنش در یک قطعه لاستیک، تنش اولیه ۱۰۰۴ MPa لازم است. پس از آنکه کرنش برای مدت ۴۰ روز ثابت بماند. تنش لازم فقط ۵۰۲ MPa خواهد بود. تنش لازم برای نگه داشتن این کرنش پس از ۸۰ روز چقدر خواهد بود. مسئله را بدون ماشین حساب حل کنید.

□ ۷-۵-۳ زمان افت پلی‌مری ۴۵ روز و مدول کشسانی آن ۷۰ MPa است (هر دو در 100°C). پلی‌مر به اندازه ۵٪ فشرده شده و در 100°C نگه‌داشته شده است. تنش در الف) ابتدا و ب) پس از ۱ روز و ج) پس از ۱ ماه و د) پس از ۱ سال چقدر است؟

جواب: الف) ۳۵ MPa ب) ۳۴ MPa ج) ۱۸ MPa د) ۱۰۰۰ Pa

□ ۷-۵-۴ اگر دما از 20°C به 30°C افزایش یابد، زمان افت نخ نایلون از ۴۰۰۰ دقیقه به ۳۰۰۰ دقیقه کاهش می‌یابد. الف) انرژی فعالسازی افت را معین کنید؛ ب) در چه دمایی زمان افت ۲۰۰۰ دقیقه است.

۷-۵-۵ لوسیت (PMM در شکل ۷-۵-۴) به مدت یک ساعت در دمای 125°C تحت بار قرار گرفته است. الف) برای آنکه کرنشی معادل آن در مدت ۳۶ ثانیه به دست آید، بار چقدر باید افزایش یابد، ب) مسئله را برای 100°C تکرار کنید.

جواب: الف) $2.5 = S_1/S_2$ ب) $14(S_1)$

□ ۷-۶-۱ ثابت دی‌الکتریک نسبی ϵ برای لاستیک ایزوپرن در 50°C ، ۳٫۰ است. اختلاف ولتاژ (dc) لازم برای آنکه چگالی بار در پوشش فلزی که لایه ۱٫۰ میلی‌متری را پوشانده است، برابر $10^{-5}\text{C}/\text{m}^2$ شود چقدر است؟

جواب: $377V$

□ ۷-۶-۲ قطبش لاستیک در مسئله ۷-۶-۱، در هر mm^2 چند الکترون را در پوشش فلزی شرکت داده است؟

۷-۶-۳ الف) در صورتی که $100V$ به خازن اعمال شود قطبش در پلی وینیل کلرید مثال ۷-۶-۲ در $100 Hz$ چقدر است؟ ب) چگالی الکترون در صفحه خازن چقدر خواهد بود؟
جواب: الف) $2.00002 C/m^2$ ب) $1.0^{15} / m^2$ الکترون $1.74 \times$

۷-۶-۴ صفحه خازنی باید ظرفیتی معادل $25 \mu f$ داشته باشد. اگر لایه $(13 mm \times 0.05)$ مایلر که به عنوان ماده بین صفحات خازن استفاده می شود دارای ثابت دی الکتریک 3.0 باشد مساحت آن چقدر باید باشد؟

۷-۶-۱ وزن پلی ایزوپرن خام (یعنی لاستیک طبیعی وولکانش نشده) پس از یافتن اتصال متقاطع با اکسیژن هوا 2.3 درصد افزایش می یابد. چه کسری از اتصالات متقاطع ممکن به وجود آمده است؟

جواب: 10%

۷-۶-۲ وزن لاستیک کلوپرن به وسیله اکسایش 3 درصد افزایش می یابد. فرض کنید که اکسیژن اتصال متقاطع به وجود آورد. چه کسری از نقاط لنگر مانند (اتصال متقاطع یافته) حاوی اتم اکسیژن است؟

۷-۶-۳ لاستیکی حاوی 47 درصد وزنی ایزوپرن، 38 درصد وزنی بوتادین، و 15 درصد وزنی ماده خشک در معرض گاز ازن قرار می گیرد و به ازای هر 100 گرم محصول اولیه g به وزن آن افزوده می شود. فرض کنید که افزایش وزن در نتیجه اتصال متقاطع به دست آید. چه کسری از اتصالات متقاطع ممکن کامل شده است؟

جواب: 27%

۷-۶-۴ الف) برای آنکه انرژی لازم برای شکستن پیوند $C-H$ میانگین در پلی اتیلن تأمین شود، فوتون چه بسامد و طول موجی باید داشته باشد؟ ب) چرا بعضی از پیوندها می توانند با امواج اندکی بلندتر الکترومغناطیسی شکسته شوند؟

۷-۶-۵ میانگین انرژی پیوند $C-Cl$ طبق جدول ۲-۳-۱، $340 kJ/mole$ ($81 kcal/mole$) است. آیا نور مرئی [$400 nm$ (بنفش) تا $700 nm$ (قرمز)] انرژی کافی برای شکستن پیوند میانگین $C-Cl$ را دارد؟

جواب: $250 nm$ لازم است.

۷-۶-۶ بر اساس داده های جدول ۲-۳-۱، انرژی خالص لازم برای آنکه شکل ۷-۶-۳

(الف) به شکل ۷-۷-۳ (ج) تبدیل شود، چقدر است؟

۷-۷-۷ (الف) میانگین و (ب) میانه چگالیهای زیر برای پلی اتیلن چقدر است؟

۰۰۹۲۶ ۰۰۹۳۰ ۰۰۹۲۴ ۰۰۹۲۳ ۰۰۹۲۱ ۰۰۹۲۶
 ۰۰۹۲۷ ۰۰۹۲۹ ۰۰۹۲۲ ۰۰۹۲۸ $\text{Mg/m}^3 (= ۰۰۹۲۸ \text{g/cm}^3)$

□ (ج) انحراف معیار چقدر است؟

جواب: (الف) ۰۰۹۲۵۶ Mg/m^3 (ب) $(۰۰۹۲۶ \text{ g/cm}^3 =) ۰۰۹۲۶ \text{ Mg/m}^3$
 (ج) ۰۰۰۰۳۰ Mg/m^3

۷-۷-۸ (الف) میانگین، (ب) میانه و □ (ج) انحراف معیار مجموعه استحکامهای زیر را برای پلی استیرن معین کنید:

۱۱۰۸	MPa	۱۲۰۸	۱۲۰۲	۱۱۰۷	۱۲۰۱	۱۲۰۰	۱۱۰۵	۱۲۰۱
۱۲۰۳		۱۲۰۷	۱۲۰۲	۱۱۰۹	۱۱۰۶	۱۲۰۴	۱۲۰۰	
۱۲۰۱		۱۲۰۹	۱۲۰۳	۱۱۰۷	۱۳۰۰	۱۲۰۳	۱۲۰۲	
۱۲۰۲		۱۳۰۱	۱۱۰۸	۱۲۰۷	۱۲۰۷	۱۲۰۱	۱۱۰۹	
۱۲۰۵		۱۲۰۴	۱۱۰۴	۱۱۰۹	۱۱۰۵	۱۲۰۱	۱۲۰۴	
۱۲۰۹		۱۲۰۵	۱۲۰۲	۱۲۰۵	۱۱۰۰	۱۲۰۳	۱۲۰۲	



مواد سرامیکی

چشم انداز فصل

مواد سرامیکی حاوی فازهای مرکب از عناصر فلزی و غیرفلزی اند. بسیاری از این مواد را می توان نام برد Al_2O_3 ، شیشه های غیرآلی، محصولات رسی، و پیزوالکتریک های پیچیده مثل $Pb(ZrTi)O_3$ همه در زمره این موادند. به طور کلی، می توان گفت که ترکیبات سرامیکی در مقابل گرما و محیط های شیمیایی مقاومتر از اجزای تشکیل دهنده آنها هستند؛ مثلاً Al_2O_3 به عنوان یک ترکیب در مقایسه با هریک از عناصر اکسیژن و آلومینیم مقاومتر است. از آنجا که ترکیبها در مقایسه با اجزای مربوط به آنها ذاتاً کوئوردیناسیون اتمی پیچیده تری دارند، درمی یابیم که در مقابل لغزش مقاومت بیشتری دارند، به طوری که سرامیکها معمولاً سخت تر و همیشه شکننده تر از اجزای فلزی یا پلی مری خودند. ویژگی های دی الکتریکی، نیم رسانایی، و مغناطیسی سرامیک های مهم برای مهندسان و دانشوران طراح یا استفاده کننده از ابزار و مدارهای الکترونیکی، به طور خاصی ارزشمند است.

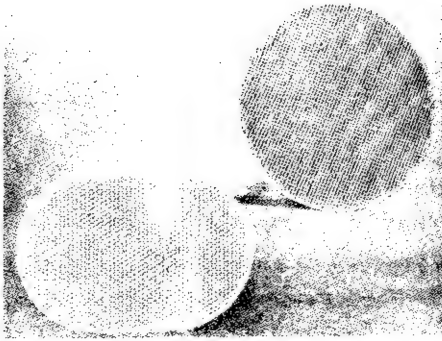
هدف از مطالعه

۱. نشان دادن آرایشهای اتمی در ساختارهای فشرده AX که در آنها $CN=۴$ ، $CN=۶$ و $CN=۸$ است.
۲. محاسبه چگالی ترکیبهای AX به منظور درک ساختارهای آنها.
۳. استفاده از ساختارهای قبلی به عنوان اساس درک چند ساختار دیگری که در کاربردهای مهندسی بیشتر به آنها برمیخوریم ($BaTiO_3$ ، Al_2O_3 ، CaF_2) و فریتها).
۴. درک منبع پیزوالکتریسته در بلورهای سرامیکی، و توانایی محاسبه قطبش.
۵. □ درک منبع فری مغناطیسی در بلورهای سرامیکی، و توانایی محاسبه مغناطیسی شدن.
۶. تشخیص اینکه (الف) چرا مواد سرامیکی (مانند ترکیبات سه بعدی دیگر) تحت فشار پراستحکام، تحت کشش ضعیف، و تردند، و (ب) برای کارایی بهینه، باید این مواد را تحت تنشهای فشاری به کار برد.
۷. مربوط کردن حرکت اتمها و جابجایی آنها به فرایندهای شکل دادن و یسکوز، نفجوشی، و بازپخت.

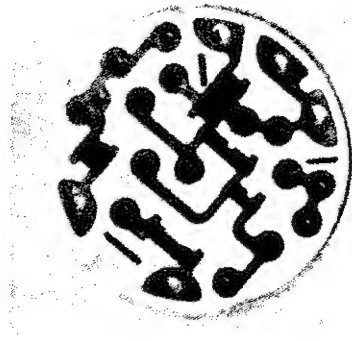
۸-۱ فازهای سرامیکی

واژه سرامیک بیشتر به عنوان صفت توصیف کننده ظروف هنری شناخته شده است، حال آنکه برای مهندس بسیاری از مواد مانند شیشه، آجر، سنگ، بتن، سایاها، لعابهای چینی، عایقهای الکتریک، مواد مغناطیسی غیرفلزی، مواد نسوز، و بسیاری دیگر (شکل ۸-۱-۱) سرامیک محسوب می شوند. ویژگی مشترک تمام این مواد آن است که ترکیباتی از فلزات و غیرفلزات اند. این ترکیبات توسط پیوندهای یونی یا کووالانسی به هم متصل می شوند. بنابراین خواص آنها با فلزات فرق دارد. سرامیکها معمولاً عایق، شفاف (یا نیمه شفاف)، نوعاً غیر قابل تغییر شکل، و در محیطهای به شدت خورنده به طور غیر قابل انتظاری پایدارند (شکل ۸-۱-۱).

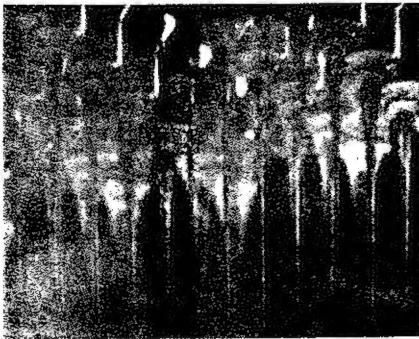
ترکیب MgO نشاندهنده ماده سرامیکی ساده ای به نسبت یک به یک از اتمهای فلز و غیر فلز است. این ترکیب بیشتر به عنوان نسوز به کار می رود زیرا می تواند به نحو فوق العاده ای در دمای بالا ($۲۵۰۰^{\circ}C - ۱۵۰۰^{\circ}C$ ، یا $۴۵۰۰^{\circ}F - ۳۰۰۰^{\circ}F$) بدون تجزیه یا ذوب شدن به کار رود. رس نیز ماده سرامیکی معمولی است ولی بسیار پیچیده تر از MgO است. ساده ترین رس $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ است. ساختار بلوری آن دارای چهار واحد مختلف Al ، Si ، O و رادیکال (OH) است. اگرچه مواد سرامیکی به سادگی



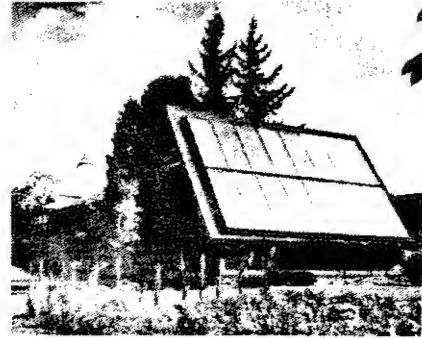
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸-۱-۱ نمونه‌هایی از محصولات سرامیکی فنی. (الف) مدارهای چاپی. قسمت اصلی آن Al_2O_3 است زیرا پیوند یونی قوی آن مانع از انتقال الکتریکی می‌شود. جزای چاپ‌شده آن گرد اکسیدهای نیم‌رسانا و فلزاتی است که جریان مدار را تأمین می‌کنند؛ (ب) نگهدارنده‌های کاتالیزوری. این قطعات سرامیکی لائسۀ زنبوری شکل در سیستم‌های اگزوز اتومبیل قرار می‌گیرند و نگهدارنده کاتالیزورهای اند که هیدروکربن‌های نسوخته را از طریق اکسایش از بین می‌برند. در اینجا بار دیگر از Al_2O_3 استفاده می‌شود زیرا در دماهای بالا و در حین کار در شرایط ارتعاشی، بسیار پراستحکام و مقاوم است؛ (ج) باتری‌های خورشیدی. شیشه جزء مهمی در گرم‌کننده‌های خورشیدی است زیرا صفحه آن نسبت به انرژی تشعشعی، شفاف است. زمانی که تشعشع به گرما تبدیل می‌شود انرژی باید ذخیره شود و باقی بماند. البته عمر زیاد و تعمیرات قابل اغماض اهمیت دارد؛ (د) رشته‌های شیشه‌ای. این رشته‌های شیشه‌ای در آزمایشگاه با عبور از شیپوره‌های پلاتینی به صورت الیاف پیوسته‌ای درآمده‌اند. ابعاد رشته‌ها با تغییر دمای شیپوره‌ها و سرعتی که در آن شیشه از شیپوره داغ عبور می‌کند کنترل می‌شود. تولید تجارتی الیاف در صدها شیپوره و با سرعت چند کیلومتر در دقیقه انجام می‌شود که در نتیجه آن الیافی به قطر چند میکرومتر به وجود می‌آید.

فلزات نیستند، آنها را نیز می‌توان بر حسب ساختار داخلی‌شان رده‌بندی و مشخص کرد. علاوه بر این از ساختار فلزات ساده می‌توان به‌عنوان نقطه شروع استفاده کرد.

مقایسه فازهای سرامیکی و غیر سرامیکی. بیشتر فازهای سرامیکی مانند فلزات ساختار بلوری دارند، ولی برخلاف فلزات در این ساختارها تعداد الکترونهای آزاد زیاد نیست. این الکترونهای به‌طریق کووالانسی با اتمهای مجاور به‌اشتراک گذاشته می‌شوند، یا از یک اتم به اتم دیگر منتقل شده پیوند یونی به‌وجود می‌آورند که در این صورت اتمها یونیده شده و بار حمل می‌کنند.

پیوندهای یونی، مواد سرامیکی را نسبتاً پایدار می‌کنند. در مجموع سرامیکها نسبت به فلزات یا مواد آلی نقطه ذوب بسیار بالاتری دارند. به‌طور کلی سخت‌تر و در مقابل تغییرات شیمیایی بادوام‌ترند، کانیهای سرامیکی جامد - مانند مواد آلی - ساینده. در دماهای بالا که انرژی گرمایی زیاد است، سرامیکها الکتریسته را هدایت می‌کنند ولی مقدار آن در مقایسه با فلزات بسیار کم است. بیشتر سرامیکها به‌دلیل نداشتن الکترون آزاد، حداقل وقتی به‌صورت ورقه‌های نازک هستند، شفاف اند و رسانای گرمایی بسیار ضعیفی هستند.

در بسیاری از مواد سرامیکی ویژگیهای بلوری دیده می‌شود. مثلاً «میکا» صفحات رخ‌پرگی دارد که در امتداد آنها به‌آسانی شکاف برمی‌دارد. همچنین در بلورهای ساده‌تر از قبیل «MgO»، مانند فلزات، لغزش پلاستیکی رخ می‌دهد. شکل بلوری آن ممکن است در حین رشد بلور به‌وجود آید؛ همچنان‌که از طرح مکعبی نمک طعام مشخص است. در پنبه نسوز بلورها تمایل زیادی به‌خطی شدن دارند؛ در میکا و خاک رس بلورها ساختار ورق مانند و دوبعدی تشکیل می‌دهند. در مواد سرامیکی محکمتر و بادوامتر ساختاری مشبک وجود دارد که دارای پیوندهایی قوی و مساوی در سه‌جهت‌اند.

ساختار بلوری مواد سرامیکی در مقایسه با فلزات نسبتاً پیچیده است. این پیچیدگی ساختاری همراه با محکمتر بودن پیوندهای بین اتمی موجب می‌شود که واکنشها در مواد سرامیکی بسیار کند صورت گیرند. مثلاً در مورد شیشه، هرگاه سرعت سرد کردن عادی باشد اتمها برای نوآرایی به‌صورت ساختار بلوری پیچیده فرصت کافی نمی‌یابند و در نتیجه تا مدت زیادی در دمای اتاق به‌صورت مایع فوق سرد باقی می‌مانند.

ساختار و خواص مواد مرکب از قبیل کاربیدها و نیتریدهای نسوز در حد واسطی بین مواد سرامیکی و فلزی قرار دارد. مثلاً اجسام مرکبی چون ZrN , BN , SiC , TiC شامل عناصر نیمه فلزی‌اند و ساختار آنها ترکیبی از پیوند فلزی و کووالانسی است. نمونه دیگر، اسپینل‌های فرومغناطیسی است. چنین ترکیباتی به‌دلیل نداشتن الکترون آزاد، رسانای خوب الکتریسته نیستند ولی اتمها می‌توانند در ساختار بلوری چنان آرایش یابند که خواص مغناطیسی موجود در آهن و فلزات وابسته به آن، در آنها ایجاد شود.

ساختار و خواص ترکیبات سیلیسیم در حد واسط بین مواد آلی و سرامیکی قرار دارد. این ترکیبات غالباً پلی‌مر غیر آلی نامیده می‌شوند. بالاخره روابط ساختاری نزدیکی

بین پلی مرهای بی شکل و شیشه‌های تجارتي وجود دارد و این مطلبی است که در فصل ۷ به هنگام تعیین دمای شیشه‌ای، T_g ، مورد بحث قرار گرفت.

۸-۲ بلورهای سرامیکی (AX)

ساده‌ترین ترکیبات سرامیکی شامل تعداد مساوی اتمهای فلزی و غیر فلزی است، این ترکیبات ممکن است یونی باشند مانند MgO، که در آنها دوالکترتون از اتم فلزی به اتم غیر فلزی انتقال یافته و کاتیون (Mg^{2+}) و آنیون (O^{2-}) به وجود آورده است. ترکیبات AX ممکن است کووالانسی باشند در این حالت الکترونهاي ظرفیتی تا حد زیادی به اشتراك گذاشته می‌شوند. روی سولفید (ZnS) نمونه‌ای از این نوع ترکیبات است.

ویژگی ترکیبات AX آن است که اتمهای A فقط توسط اتمهای X احاطه شده‌اند و نخستین همسایه‌های اتمهای X، اتمهای A هستند. به همیی دلیل اتمها (یا یونهای) A و X کاملاً منظم‌اند. اگر تعداد اتمهای X و A مساوی و عدد کوئوردیناسیون مطابق با آنچه باشد که گفته شده، سه شق عمده برای تشکیل ترکیبات AX وجود دارد که عبارت‌اند از

$$CsCl \text{ با } CN=8$$

$$NaCl \text{ با } CN=6$$

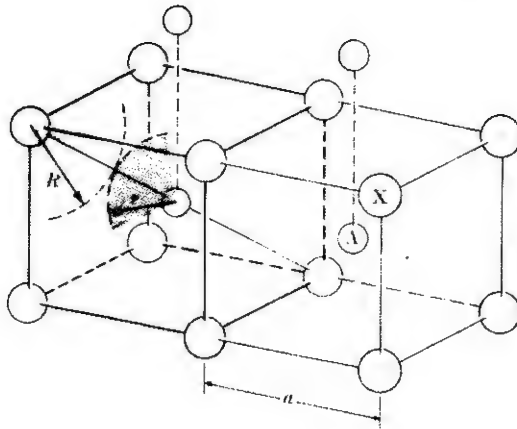
$$ZnS \text{ با } CN=4$$

CsCl آرایه مکعبی ساده‌ای دارد. NaCl و ZnS آرایه fcc دارند.

ساختارهای AX (نوع CsCl). در شکل ۸-۲-۱ هر اتم A هشت همسایه از اتمهای X دارد. (وبسط ساختار نشان می‌دهد که هر اتم X هشت همسایه از اتمهای نوع A دارد.) این ساختار bcc نیست زیرا مکانهای ۵،۵،۵ و ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ یکسان نیستند. بلکه مکعبی ساده است به طوری که مکانهای معادل فقط با انتقالهایی برابر مضرب صحیح a به هم مربوط می‌شوند. در شکل ۸-۲-۱ از آنجا که مکانهای اشغال شده توسط اتمها یا یونهای A در مکانهایی قرار دارند که توسط هشت همسایه احاطه شده است، می‌توان از آنها به عنوان مکانهای بین نشینی ۸ گانه (یا به عبارت ساده تر مکانهای f-۸) در شبکه مکعبی ساده نام برد.

همین ساختار در بخش ۳-۵ و شکل ۳-۵-۴ به عنوان ساختار برنج β' مورد بررسی قرار گرفته بود. ولی به طور کلی بین سرامیکها معمول نیست. زیرا کاتیونهایی که الکترون از دست می‌دهند، تا حد قابل توجهی کوچکتر از آنیونهایی‌اند که الکترونهای اضافی دارند. بنابراین در تعداد اندکی از ترکیبات یونی نسبت r/R برابر ۰٫۷۳ یا بیشتر است و این نسبتی است که برای $CN=8$ لازم است (جدول ۲-۶-۱).

ثابت شبکه a در ترکیب نوع CsCl مستقیماً به شعاع یونی بستگی دارد، زیرا $(r+R)$ نصف قطر مکعب است.

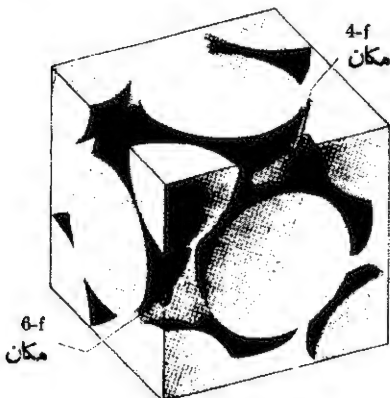


شکل ۸-۲-۱ ساختار AX (نوع CsCl). اتم یا یون A در مکان بین‌نشینی بین هشت اتم X (در مکان ۸-f) قرار می‌گیرد. این مکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ در تمام سلولهای واحد اشغال شده‌اند. همچنین باید توجه داشت که اتمهای X بین ۸ اتم A قرار گرفته‌اند. ثابت‌شده برای $2(r+R)/\sqrt{3}$ است.

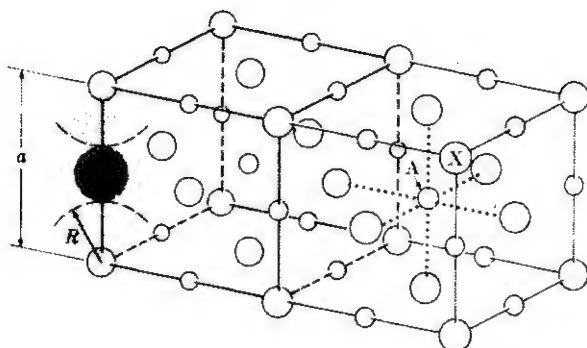
$$(r+R)_{\text{CsCl}} = a\sqrt{3}/2 \quad (۸-۲-۱)$$

البته از آنجا که $CN=8$ است، باید در شعاعهای یونی مندرج در پیوست (ب) تصحیحاتی انجام داد. یادآوری می‌شود که $97/100 \approx (R_{CN=6})/(R_{CN=8})$.

ساختار AX (نوع NaCl). ساختار نوع NaCl دارای شبکه fcc از آنیونهای است که در آن یونهای مثبت در مکانهای بین‌نشینی ۶-g (مکانهای f-۶) قرار دارند. چنین مکانی در شکل ۸-۲-۲ شرح داده شده است. ساختار NaCl در شکل ۳-۱-۱ دیده



شکل ۸-۲-۲ مکانهای بین‌نشینی در شبکه fcc. مکانهای ۶-f بین شش اتم همسایه قرار دارند. در هر سلول واحد چهار مکان از این نوع وجود دارد. مکان ۴-f بین چهار اتم همسایه قرار دارد. در هر سلول واحد هشت مکان از این نوع وجود دارد.



شکل ۳-۲-۸ ساختار AX (نوع NaCl). این شکل را با شکل‌های ۱-۱-۳ و ۲-۲-۸ مقایسه کنید. هر اتم A بین شش اتم X قرار دارد (و هر اتم X بین شش اتم A قرار دارد). در هر سلول واحد چهار مکان بین‌نشینی f-۶ موجود است. همه این مکانها پر شده‌اند. ثابت شبکه a برابر است با $(2r + 2R)$.

می‌شود. ترکیب این دوشکل در شکل ۳-۲-۸ نیز کشیده شده است. مکانهای fcc معمولاً در نقاط زیر قرار دارند

$$(2-2-8) \quad 0,0,0 \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, 0 \quad \frac{1}{4}, 0, \frac{1}{4} \quad 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$$

و مکانهای f-۶ عبارت‌اند از

$$(3-2-8) \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \quad 0, 0, \frac{1}{4} \quad 0, \frac{1}{4}, 0 \quad \frac{1}{4}, 0, 0$$

تعداد هر دو مساوی است؛ بنابراین مکانهای f-۶ در ترکیبات AX اشغال شده‌اند. در اینجا نیز مانند ساختار نوع CsCl، فرقی نمی‌کند که تمام یونهای A در مکانهای fcc قرار گرفته باشند یا برعکس در مکانهای f-۶.

چندصد ترکیب با ساختار نوع NaCl وجود دارند؛ مثلاً با FeO ، NiO ، MgO (شکل ۲-۳-۲)، و MnS در صنعت بیشتر از همه برخورد می‌کنیم. قبلاً در رابطه (۲-۲-۳) مشاهده کردیم که ثابت شبکه a برابر است با دو برابر مجموع دو شعاع، $2(r+R)$ ، زیرا یونهای مشابه با هم «تماس» دارند در صورتی که یونهای مشابه با هم تماس ندارند. کمینه نسبت شعاع، r/R برای این ساختار برابر ۰٫۴۱ است (جدول ۲-۶-۱). نسبت بیشینه وجود ندارد؛ ولی در ترکیبات یونی که در آنها r/R است معمولاً ساختارهای نوع CsCl پایدارترند.

ساختار AX (نوع ZnS). یکی از مکانهای f-f در شبکه fcc آنها نیز در شکل ۲-۲-۸ نشان داده شده است. در ساختار نوعی از ترکیبات ممکن است اتمهای X در مکانهای

$$(۲-۲-۸) \quad 0, 0, 0 \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, 0 \quad \frac{1}{4}, 0, \frac{1}{4} \quad 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4};$$

و اتمهای A در مکانهای

$$(۴-۲-۸, \text{الف}) \quad \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4} \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \quad \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \quad \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$$

قرار داشته باشد.

برای اولین بار در فصل ۵، در ترکیبات نیمرسانا با ساختار نوع ZnS برخورد کردیم [شکل ۳-۴-۵ (ب)]. این ساختار در آن مورد، قابل قبول بود زیرا این ترکیبات برای داشتن پیوند کسوالانسی مستلزم $CN = ۴$ هستند. در حقیقت علت اینکه بیشتر ترکیبات نوع ZnS این ساختار را دارند این است که شرایط پیوند کسوالانسی را فراهم کنند و نه به علت آنکه نسبت یون r/R در آنها کم است.

شکلهای ۳-۴-۵ (ب) و ۲-۲-۸ اساس شکل ۲-۲-۸ هستند. از این شکل می توان مجموع $(r+R)$ را به ثابت شبکه a مربوط کرد زیرا مکانهای f-f در سلول واحد در محلهای $1/4$ قرار می گیرند

$$(r+R)^2 = \left(\frac{a}{4}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2$$

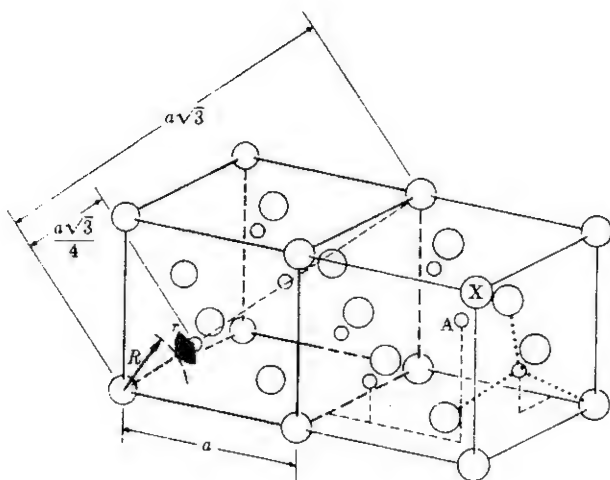
$$a = \frac{4(r+R)}{\sqrt{3}} \quad (۵-۲-۸)$$

□ ساختار AX (غیر مکعبی). تمام ترکیبات AX مکعبی نیستند. دو مثال ساده در این مورد ترکیباتی اند که اتمهای X آنها آرایه hcp دارند. در ساختار نوع NiAs، اتمهای A در تمام محلهای بین نشینی f-f قرار دارند. ساختار نوع ZnO، اتمهای A در وسط مکانهای f-f قرار می گیرند (جدول ۱-۲-۸). در فصل ۳ گفته شد که در فلزات fcc و hcp ضریب فشردگی مساوی (۰.۷۴) است و عدد کوئوردیناسیون آنها یکسان (۱۲)

* یا شق دیگر، در محلهای

$$(۴-۲-۸, \text{ب}) \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \quad \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \quad \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \quad \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}$$

در هر سلول واحد fcc هشت محل f-f وجود دارد. بنابراین فقط نیمی از اینها توسط ترکیبات AX اشغال شده است، زیرا در هر سلول واحد فقط چهار مکان fcc وجود دارد.



شکل ۸-۲-۴ ساختار AX (نوع ZnS) این شکل را با شکل‌های ۵-۴-۳ (ب) و ۸-۲-۲ مقایسه کنید. هر اتم A بین چهار اتم X (و هر اتم X بین چهار اتم A) قرار دارد. در هر سلول واحد فقط چهار مکان از هشت مکان f-۴ پر شده است. ثابت شبکه a برابر است با $\frac{4(r+R)}{\sqrt{3}}$.

است. تنها اختلاف آنها در تکرار صفحات اتمی است. در اینجا نیز به همین ترتیب ساختارهای NaCl و NiAs و ساختارهای ZnO و ZnS به هم مربوط اند. ولی در هر صورت تقارن نوع hcp از نوع مکعبی کمتر است. بنا بر این FeS (با ساختار نوع NiAs) بسیار سخت و شکننده است؛ در عوض MnS (با ساختار نوع NaCl) جزء ترکیبات انعطاف پذیرتر AX است.

مثال ۸-۲-۱ ترکیب CsBr همان ساختار CsCl را دارد. مراکز دو یون متفاوت ۳۷۰ nm فاصله دارد. الف) چگالی CsBr چقدر است؟ ب) شعاع یونهای Br^- در این ساختار چقدر است؟

حل:

$$a = \frac{2(0.37 \text{ nm})}{\sqrt{3}} = 0.427 \text{ nm} \quad (\text{الف})$$

یا به دست آوردن جرمهای اتمی از شکل ۲-۱-۱

$$\rho = \frac{(132.9 + 79.9 \text{ g}) / (0.602 \times 10^{24})}{(0.427 \times 10^{-9} \text{ m})^3} = 4.5 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

جدول ۸-۲-۱ فشردگی ترکیبات AX

اتمهای A

ساختمان	شبکه اتمهای X	مکانهای بین‌نشینی	مکانهای پر شده	مثالهای دیگر
CsCl	sc	مکانهای ۸-f	همه	
NaCl	fcc	مکانهای ۶-f	همه	MgO, MnS, LiF
ZnS*	fcc	مکانهای ۴-f	$\frac{1}{2}$	β -SiC, CdS, AlP
NiAs	hcp	مکانهای ۶-f	همه	FeS, MnTe
ZnO	hcp	مکانهای ۴-f	$\frac{1}{2}$	BeO, ZnS*, AlN

* ZnS مانند بسیاری از ترکیبات سرامیکی بیش از يك چندشکلی دارد. چند شکلی مکعبی اسفالریت (یا بلند) نامیده می‌شود که از نام فراوانترین کانی روی نشأت می‌گیرد. چند شکلی منشور شش بر، و دریتزیت نام دارد.

$$= 4.5 \text{ Mg/m}^3 \quad (\text{یا } 4.5 \text{ g/cm}^3)$$

ب) با استفاده از پیوست (ب)، وقتی $\text{CN}=6$ ، $r_{\text{Cs}^+} = 0.167 \text{ nm}$

$$R_{\text{Br}^-} = 0.27 \text{ nm} - \frac{0.167 \text{ nm}}{0.97} = 0.20 \text{ nm}$$

توضیح. این شعاع برای $\text{CN}=8$ است. R_{Br^-} در ساختار $\text{CN}=6$ تقریباً برابر است با 0.19 nm .

مثال ۸-۲-۲ چگالی FeO را که ساختاری از نوع NaCl دارد حساب کنید. (فرض کنید تعداد یونهای Fe و O مساوی است).
حل: از جدول ۸-۲-۱، یا پیوست (ب)

$$r_{\text{O}^{2-}} = 0.140 \text{ nm} \quad \text{و} \quad r_{\text{Fe}^{2+}} = 0.074 \text{ nm}$$

که در آن $\text{CN}=6$. در هر سلول واحد 4Fe^{2+} و 4O^{2-} وجود دارد. (شکل ۸-۲-۳ را ببینید.) پس

$$V = a^3 = [2(0.0074 + 0.0140) \times 10^{-8} \text{ m}]^3$$

$$= 7872 \times 10^{-24} \text{ m}^3$$

$$m = \frac{4(55.8 + 16.0 \text{ amu})}{(0.06 \times 10^{24} \text{ amu/g})}$$

$$= 279 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$\rho = m/V = \frac{279 \times 10^{-24} \text{ g}}{7872 \times 10^{-24} \text{ m}^3} = 61 \times 10^6 \text{ g/m}^3 \text{ (یا } 61 \text{ g/cm}^3)$$

توضیح. چگالی اندازه‌گیری شده تقریباً 57 g/cm^3 است زیرا این ساختار دارای تهیجیهایی در محل کاتیونهاست (شکل ۲-۳-۴ و مثال ۱-۳-۴). ▲

مثال ۳-۲-۸ ترکیب CdS همان ساختار ZnS را دارد. مراکز دویسون متفاوت 25 nm از هم فاصله دارد. الف) حجم سلول واحد چقدر است؟ ب) چگالی چقدر است؟

حل:

$$a = \frac{4(r+R)}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{4(0.25)}{\sqrt{3}} = 0.577 \text{ nm}$$

$$a^3 = 0.192 \text{ nm}^3$$

الف)

ب) از آنجا که $\text{Cd} = 112.4 \text{ amu}$ و $\text{S} = 32.2 \text{ amu}$ (شکل ۱-۱-۲)

$$\rho = \frac{4(112.4 + 32.2 \text{ g})}{(0.192 \times 10^{-24} \text{ m})^3} = 50 \text{ Mg/m}^3 \text{ (یا } 50 \text{ g/cm}^3)$$

مثال ۴-۲-۸ MnS سه تاجندشکلی دارد. دو نوع از آن عبارت‌اند از الف) ساختار نوع NaCl (شکل ۳-۲-۸) و ب) ساختار نوع ZnS (شکل ۴-۲-۸). در صورتی که ساختار نوع دوم (ZnS) به ساختار نوع اول (NaCl) تبدیل شود چند درصد تغییر حجم دیده می‌شود؟ (در مورد شعاع در حالت $\text{CN} = 6$ به پیوست (ب) رجوع کنید و وقتی که $\text{CN} \neq 6$ است بانوشت پیوسته آن را ببینید.)

حل: هر سلول واحد (شکلهای ۳-۲-۸ و ۴-۲-۸) 4 Mn^{2+} و 4 O^{2-} دارد. بنابراین می‌توان یک سلول واحد از هر کدام را در نظر گرفت.

$$V = a^3 = [2(0.080 + 0.184 \text{ nm})]^3 = 0.147 \text{ nm}^3 \quad (\text{الف})$$

$$V = a^3 = \left[\frac{2(0.073 + 0.167 \text{ nm})}{\sqrt{3}} \right]^3 = 0.170 \text{ nm}^3 \quad (\text{ب})$$

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right)_{b \rightarrow a} = -147/0$$

توضیح. فقط نوع NaCl پایدار است، ولی دو چند شکلی دیگر با مواد اولیه مناسب و روشهای خاص تبلور می‌توانند تشکیل شوند. ▲

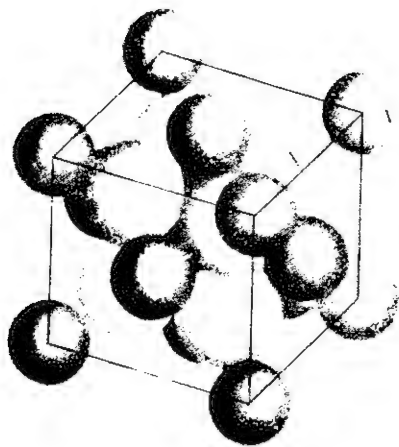
۳-۸ بلورهای سرامیکی A_mX_p

تمام ترکیبات دوتایی تعداد مساوی از اتمها (یا یونها)ی A و X ندارند. بین حالات مختلف، تنها دو حالت را برای نشان دادن نکات آن در نظر می‌گیریم، ساختار CaF_2 و ساختار Al_2O_3 . فلوریت CaF_2 ، الگوی ساختار، UO_2 است که در سوختهای هسته‌ای به کار می‌رود و الگویی برای یکی از چندشکلیهای « ZrO_2 » است که به عنوان اکسید دیرگداز استفاده می‌شود. کراندم، Al_2O_3 ، یکی از متداولترین سرامیکهایی است که در صنعت کاربرد دارد. و از جمله کاربردهایش می‌توان از شمع اتومبیل (شکل ۲-۷-۳)، سنگ سنباده، پمپ اسیدی، زمینه مدارهای چاپی [شکل ۸-۱-۱ (الف)] و مواد دما بالا برای نگهدارنده‌های کاتالیزور در سیستم اگزوز [شکل ۸-۱-۱ (ب)] نام برد.

ساختار « CaF_2 » در مکانهای fcc: ۰، ۰، ۰؛ ۱/۲، ۱/۲، ۰؛ ۱/۲، ۰، ۱/۲؛ و ۱/۲، ۱/۲، ۰ کاتیون Ca^{2+} دارد. آنیونهای F^- در مکانهای f-۴ بین‌نشینی، بین کاتیونها قرار دارند و شامل هر دو مجموعه در روابط (۸-۲-۴ الف و ب) هستند. این نسبت ۴ به ۸ Ca^{2+} به F^- با نسبت ۱ به ۲ برای m به p در A_mX_p مطابقت دارد. در شکل ۸-۳-۱ نمونه‌ای از آن دیده می‌شود.

ساختاری که شرح دادیم fcc با یون F^- در مکانهای f-۴ بین یونهای Ca^{2+} است. علاوه بر این، یونهای کلسیم بین هشت یون فلوئور قرار دارند. ولی توجه داشته باشید که تمام مکانهای f-۸ اشغال نشده‌اند؛ مثلاً آنهایی که در مرکز سلول واحد قرار دارند (شکل ۸-۳-۱) و آنهایی که در وسط ضلعهای سلول واحد قرار می‌گیرند. این مکانهای خالی در UO_2 که به عنوان سوخت هسته‌ای به کار می‌رود و دارای این ساختار بلوری است اهمیت دارد. زیرا این سوراخها، فضایی برای محصولات شکافت هسته‌ای‌اند.*

* اگر فلز اورانیم به عنوان سوخت مصرف شود، وقتی اتمها به دو یا چند دختر-اتم تقسیم می‌شوند انبساط بسیاری به وجود می‌آید زیرا بلور فلزی، مکانهای خالی قابل‌مقایسه‌ای ندارد.



شکل ۸-۳-۱ ساختار AX_2 (نوع CaF_2).
 اتمهای A در شبکه fcc قرار دارند و اتمهای X تمام مکانهای بین‌نشینی بین‌اتم را اشغال کرده‌اند. (در مرکز سلول واحد اتمی وجود ندارد). در شکل ۸-۳-۲ دیده می‌شود که یونهای F^- با هم تماس ندارند.

آخرین ترکیب دوتایی که مورد نظر قرار می‌دهیم، ساختار Al_2O_3 است. آرایه یونهای O^{2-} در آن hcp است. دوسوم مکانهای بین‌نشینی f-6 توسط یونهای Al^{3+} اشغال شده‌اند. درحالی‌که فاصله بین اتمی یونهای $3+$ و $2-$ آلومینیم و شش اکسیژن مجاور آن فقط ۱۹۱ nm است و انتظار داریم که انرژی پیوند بالا باشد. ** این امر در دمای ذوب ($> 2000^\circ C$)، سختی ($Mohs = 9$)، و مقاومت Al_2O_3 در برابر بسیاری از مواد شیمیایی منعکس می‌شود. علاوه بر این ترکیب رسانندگی الکتریکی کم و رسانندگی گرمایی نسبتاً بالا (بیوست ج) موجب شده است که Al_2O_3 برای بسیاری از کاربردهای الکتریکی مناسب باشد.

مثال ۸-۳-۱ ثابت شبکه CaF_2 برابر ۵۴۷ nm است. الف) آرایش یونها را روی صفحه (۱۱۰) CaF_2 رسم کنید. ب) جمع دو شعاع ($r_{Ca^{2+}} + r_{F^-}$) چقدر است؟ ج) چگالی خطی مکانهای معادل در جهت [۱۱۲] چقدر است؟

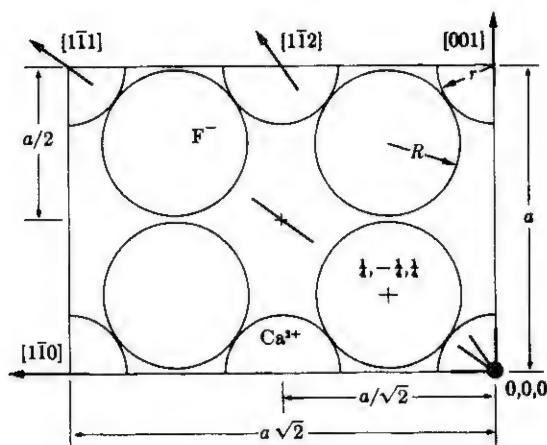
حل: الف) شکل ۸-۳-۲، نشان‌دهنده صفحه (۱۱۰) است که در شکل ۸-۳-۱ رسم شده است.

$$r + R = \sqrt{\left(\frac{a}{4}\right)^2 + \left(-\frac{a}{4}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2} = \frac{a\sqrt{3}}{4} \quad (ب)$$

$$= (0.547 \text{ nm}) \frac{\sqrt{3}}{4} = 0.237 \text{ nm}$$

* این کار ساختار را بسیار ساده می‌کند، زیرا اعوجاج حاصل از این مکانهای خالی f-6 به حساب نیامده است.

** یا توجه به رابطه (۲-۵-۱)، نیروی جاذبه کولنی با $Z_1 Z_2 / a_1^2$ متناسب است که در آن Z_1 و Z_2 نشان‌دهنده ظرفیت‌اند.



شکل ۸-۳-۲ ساختار CaF_2 . [صفحه (۱۱۰)]. (مثال ۸-۳-۱ را ببینید).

□ ج) چون CaF_2 fcc است، برداری که از \circ ، \circ ، \circ به نقطه $\langle 1/2, 1/2, 1/2 \rangle$ رسم شود همان فاصله تکرار شونده است،

$$\sqrt{a^2 + \left(-\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

بنابراین

$$t = a\sqrt{1.5} = 0.547 \text{ nm} (1.225) = 0.67 \text{ nm}$$

$$\text{چگالی خطی} = 1.29 / \text{nm} \text{ (یا } 1.5 \times 10^6 / \text{mm)}$$

توضیح. یونهای F^- تقریباً 0.3 nm از هم فاصله دارند (شکل ۸-۳-۲). داده‌های پیوست (ب) نشان می‌دهد که $a = 0.515 \text{ nm}$ ؛ ولی دافعه متقابل یونهای F^- در اطراف مکانهای خالی $\text{F}-\text{F}$ در نظر گرفته نشده است. این دافعه ساختار را منبسط می‌کند.

این همان ساختار UO_2 است. مکانهای پر نشده $\text{F}-\text{F}$ فضایی برای محصولات شکافت هسته‌ای فراهم می‌آورند تا این محصولات درون بلور باقی بمانند. ▲

□ مثال ۸-۳-۲ اورانیم دی‌اکسید، ساختار CaF_2 را دارد. بنابراین دارای مکان بین‌نشینی بزرگی در مرکز سلول واحد است (شکل ۸-۳-۲ را ببینید). الف) در هر سلول واحد چندحفره از این نوع وجود دارد؟ ب) با استفاده از داده‌های تصحیح شده پیوست (ب) نسبت شعاعها، r/R ، در UO_2 چقدر است؟

حل: الف) سلول واحد fcc است؛ بنابراین چهار مکان خالی معادل وجود دارد که

عبارت‌اند از $1/2, 1/2, 1/2$ و جایگشت‌های $\pm a/2, 0, \pm a/2$ (بخش ۳-۵). این مکان‌ها شامل مکان‌های خالی مرکز و نقاط وسط تمام یال‌های سلول واحد است (که هر يك به نوبه خود به ۴ سلول واحد پیوسته‌اند). که در مجموع تعداد آنها به $1 + 12/4 = 4$ می‌رسد. ب) از آنجا که اعداد کوئوردیناسیون آنها به ترتیب برابر ۸ و ۴ است، داریم

$$r_{U^{4+}} = \frac{0.097 \text{ nm}}{0.97} = 0.100 \text{ nm} \quad \text{و} \quad R_{O^{2-}} = \frac{0.140 \text{ nm}}{1.1} = 0.127 \text{ nm}$$

$$\frac{r}{R} = 0.79$$

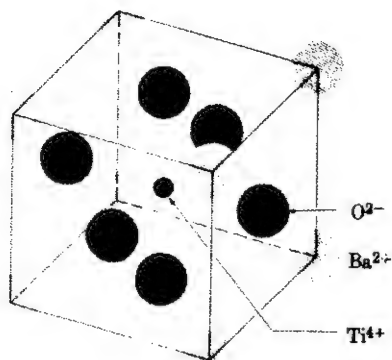
توضیح. ساختاری با $CN = 6$ (و بنابراین $0.097 \text{ nm} / 0.140 \text{ nm} = 0.69$) برای UO_2 پیشنهاد می‌شود. ولی با این کوئوردیناسیون دوام نمی‌تواند نسبت ۱ به ۲ داشته باشند.

▲

۸-۲ ترکیبات چندتایی

ساختارهای نوع $A_m B_n X_p$ اگرچه وجود سه نوع اتم غالباً موجب پیچیدگی بیشتر ساختار می‌شود، در اینجا چند ترکیب قابل توجه از « $A_m B_n X_p$ » بررسی می‌شوند. اولین نوع « $BaTiO_3$ » است که الگوی اولیه‌ای برای آن دسته از مواد سرمایی است که از جمله کاربردهایشان کارتریج گرامافون است. بالاتر از 120°C سلول واحد $BaTiO_3$ مکعبی است که در آن یونهای Ba^{2+} در گوشه‌ها، یونهای O^{2-} در مراکز وجوه، و يك یون Ti^{4+} در مرکز سلول واحد قرار گرفته است (شکل ۸-۴-۱). این ساختار زیر 120°C اندکی تغییر می‌کند. با این تغییر تبدیل به ماده پیزوالکتریک مفیدی می‌شود (بخش ۸-۶).

مغناطیسی‌های غیرفلزی ممکن است از ترکیبات $A_m B_n X_p$ باشند که متداولترین آنها



شکل ۸-۴-۱ ساختار مکعبی $BaTiO_3$. این ساختار بالای 120°C پایدار است و در این حالت یون Ti^{4+} در مرکز مکعب، یونهای Ba^{2+} در رئوس و یونهای O^{2-} در مراکز وجوه قرار دارند.

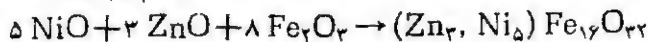
فرواسپینلی است (که غالباً فریت نامیده می‌شود). ترکیب فرواسپینل MFe_2O_4 است که در آن M نشان‌دهنده کاتیونهای دوظرفیتی باشعاع $0.075 \pm 0.001 \text{ nm}$ است. در این ساختارهای اسپینل f-۲ یونهای O^{2-} آرایه (fcc) متراکمی به وجود می‌آورند که کاتیونها در نیمی از مکانهای f-۶ و در یک هشتم مکانهای بین‌نشینی f-۴ قرار می‌گیرند (شکل ۸-۲-۲). موقعیت کاتیونها در ویژگی آهنربایی این مواد مؤثر است.

□ **محلولهای جامد.** درباره محلولهای جامد در ترکیبات یونی به‌طور خلاصه در بخش ۳-۴ بحث شد و معلوم شد که برای تشکیل محلولهای جامد دو عامل بسیار مهم وجود دارد: (۱) سازگاری در اندازه اتمی و (۲) موازنه بار الکتریکی. البته این عوامل آنقدرها محدودکننده نیستند زیرا موازنه بار می‌تواند انجام شود. مثلاً، در MgO یونهای Li^+ ممکن است جانشین یونهای Mg^{2+} شوند و این به شرطی است که همزمان F^- نیز موجود باشد که جانشین O^{2-} شود. برعکس، MgO ممکن است در LiF حل شود. همچنین Mg^{2+} ممکن است در LiF حل شود بدون اینکه تعداد کافی از یونهای O^{2-} موجود باشد که البته در این صورت تهیه‌یابی کاتیونی به وجود می‌آید یعنی به جای هر « Li^+ » یک « $Mg^{2+} + \square$ » قرار می‌گیرد.

محلولهای جامد با «اسپینل‌های مغناطیسی» پیشگفته برای کسانی که با سرامیک کار می‌کنند اهمیت زیادی دارند زیرا خواص مغناطیسی بهینه‌نگامی حاصل می‌شود که قسمتی از یونهای دوظرفیتی روی ($r = 0.074 \text{ nm}$) باشد و موازنه آنها به وسیله یونهای فرومغناطیسی مثل Ni^{2+} ($r = 0.069 \text{ nm}$) است. انجام گیرد و این، حالت ساده‌ای از جایگزینی مستقیم است، با وجود این برای برخی کاربردها بهتر است به جای M^{++} ، جفت Li^+Fe^{3+} یا به جای Fe^{3+} ، جفت $Mg^{2+}Ti^{4+}$ جایگزین شود.

مثال ۸-۴-۱ شبکه نوعی فرواسپینل ۳۲ یون اکسیژن، ۲۶ یون فریک و ۸ یون دوظرفیتی دارد. (برای تعیین الگوی تکرار شونده توجه کنید که هر سلول واحد آن هشت برابر سلول واحد MgO یون اکسیژن دارد). اگر کسر تعداد یونهای دوظرفیتی Zn^{2+} و Ni^{2+} برابر ۳/۵ باشد، برای این عمل چه کسر وزنی از ZnO و NiO را باید با هم مخلوط کرد؟

حل: ۸ مول Fe_2O_3 : مبنا



کسر وزنی

$$\begin{aligned} 5NiO &= 5(58.71 + 16.00) &= 373.5 &= 0.192 \\ 3ZnO &= 3(65.37 + 16.00) &= 244.1 &= 0.129 \\ 8Fe_2O_3 &= 8[2(55.85) + 3(16.00)] &= 1277.6 &= 0.674 \\ \hline &&1895.2 &100.0 \end{aligned}$$

□ مثال ۸-۴-۲ محلول جامد MgO و LiF حاوی ۱۱ درصد وزنی اکسیژن، $52F$ ، Mg ۰.۲۰ و Li ۱۷ است. در هر ۲۰۰ سلول واحد چندتهیجای وجود دارد؟

حل: نسبت‌های اتمی را می‌توان از وزنهای اتمی محاسبه کرد

$$\text{اکسیژن} : \frac{11}{16} = 0.688$$

$$\text{فلوئور} : \frac{52}{19} = 2.737$$

$$\text{منیزیم} : \frac{20}{24.31} = 0.823$$

$$\text{لیتیم} : \frac{17}{6.94} = 2.450$$

ساختار از نوع $NaCl$ است؛ بنابراین ۲۰۰ سلول واحد دارای ۸۰۰ آنیون (و ۸۰۰ مکان کاتیون) است

$$\left. \begin{aligned} \text{آنیون ۸۰۰} &= 16007 \\ \text{اکسیژن} &= 800(0.688) / (0.688 + 2.737) \\ \text{فلوئور} &= 800(2.737) / (0.688 + 2.737) = 6393 \end{aligned} \right\}$$

براساس فلوئور

$$\left. \begin{aligned} \text{کاتیون ۷۶۴۵} &= 19202 \\ \text{منیزیم} &= 0.823(6393 / 2.737) \\ \text{لیتیم} &= 2.450(6393 / 2.737) = 5723 \end{aligned} \right\}$$

$$\text{سلول واحد } 200 = 800 - 7645 = 355 / 200$$

توضیح. نفوذ کاتیون در این محلول جامد بسیار سریعتر از LiF یا MgO است. ▲

۸-۵ سیلیکاتها

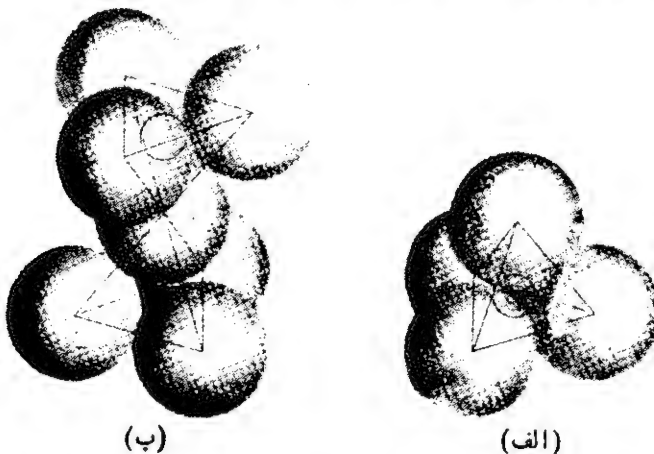
بسیاری از مواد سرامیکی حاوی سیلیکات‌اند زیرا سیلیکاتها فراوان و ارزان و در ضمن برخی خواص آنها از نظر مهندسی مسرود توجه است. شاید معروفترین سیلیکات، سیمان پرتلند باشد که قادر است توده‌هایی از صخره‌ها را به هم پیوند دهد و به‌صورت یکپارچه درآورد. بسیاری از مواد ساختمانی دیگر چون آجر، موزائیک، شیشه (شکل ۸-۱-۱)، و لعاب شیشه‌ای نیز از سیلیکاتها ساخته می‌شوند. سایر کاربردهای مهندسی سیلیکاتها عبارت‌اند از عایقهای الکتریکی، ظروف شیمیایی، و الیاف شیشه‌ای تقویت‌کننده.

واحدهای چهاروجهی سیلیکات. واحد اصلی ساختاری سیلیکاتها، چهاروجهی « SiO_4 »

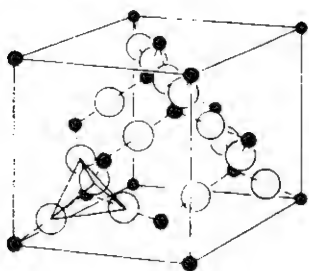
است و [شکل ۸-۵-۱ (الف)]، که در آن يك اتم سیلیسیم بین چهار اتم اکسیژن به صورت بین نشینی قرار گرفته است. نیروهایی که این چهار وجهیها را بهم پیوند می دهد هم پیوند یونی و هم پیوند کووالانسی را شامل می شود. در نتیجه اتصال چهار وجهی بسیار محکم است. ولی با وجود هر دو مکانیسم پیوند یونی و کووالانسی، هر اکسیژن چهار وجهی به جای هشت الکترون در مدار آخر فقط هفت الکترون دارد.

کمبود الکترون را در یونهای اکسیژن به دو طریق می توان جبران کرد: (۱) از اتمهای فلز دیگر الکترون به دست آورد که در این صورت یونهای SiO_4^{4-} و فلز + حاصل می شود. (۲) هر اکسیژن با يك سیلیسیم دیگر جفت الکترون به اشتراك بگذارد و در این حالت گروههای کوئوردیناسیون چهار وجهی متعددی پدید می آید [شکل ۸-۵-۱ (ب)]. اکسیژن به اشتراك گذاشته شده اکسیژن پلساز است.

سیلیکاتهای مشبك. در SiO_2 خالص یون فلزی موجود نیست. هر اتم اکسیژن اتم پلسازی بین دو اتم سیلیسیم است (و مطابق با شکل ۵-۸-۲، هر اتم سیلیسیم بین چهار اتم اکسیژن واقع است) در این حالت ساختار مشبکی به وجود می آید. همچنان که کربن می تواند به دو شکل گرافیت یا الماس در آید، سیلیس (SiO_2) نیز می تواند چند ساختار بلوری مختلف داشته باشد. ساختاری که در شکل ۵-۸-۲ دیده می شود در دماهای بالا وجود دارد. ساختار معمولیتر سیلیس، کوارتز است که به صورت ماسه در سواحل یافت می شود. کوارتز نیز



شکل ۸-۵-۱ (الف) آرایش چهار وجهی SiO_4^{4-} ، در مقایسه با شکل ۵-۸-۳ (ب) یونهای SiO_4^{4-} از منابع دیگر چهار الکترون به دست آورده اند؛ (ب) واحد چهار وجهی دوگانه $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ ، اتم اکسیژن مرکزی در هر واحد چهار وجهی به اشتراك گذاشته شده است. بنابراین به صورت اکسیژن پلساز در می آید.



شکل ۸-۵-۲ ساختار مشبك (SiO_2). هر اتم سیلیسیم با چهار اتم اکسیژن احاطه شده است و هر اتم اکسیژن عضو دو چهاروجهی SiO_4 است (به شکل‌های ۸-۲-۴ و ۵-۴-۳ رجوع کنید)، این شکل دیگر از سیلیس، کریستوبالیت نام دارد.

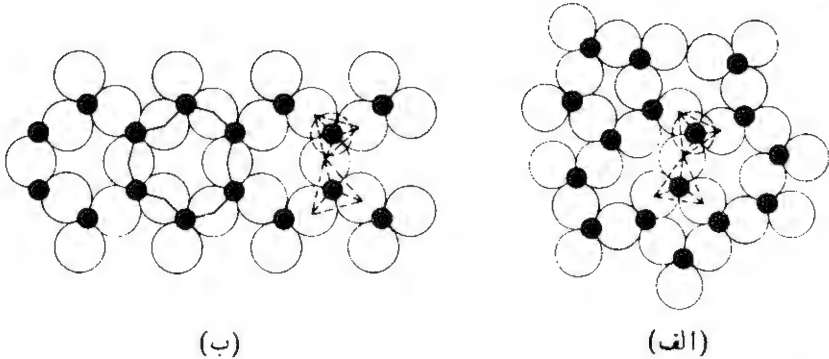
مانند SiO_2 در شکل ۸-۵-۲ دارای چهار وجهیهای SiO_4 است ولی شبکه‌اش پیچیده‌تر است.

فلداسپار نوع دیگری از سیلیکاتهای طبیعی است. این کانی صورتی رنگی یا قهوه‌ای مایل به زرد، گرانیت، KAlSi_3O_8 است که آن را می‌توان سیلیکاتی شبکه‌ای در نظر گرفت که به جای یکی از چهار سیلیسیم آن يك يون Al^{3+} جایگزین شده است. در مقایسه با سیلیسیم که ۴ بار دارد Al دارای سه بار است. بنابراین وجود K^+ موجب موازنه بار می‌شود. یونهای K^+ یونهای بین‌نشین‌اند با وجود این ساختارهای مشبك کاملاً بازند و می‌توانند یونهای اضافی را در خود جای دهند (به شکل ۸-۵-۲ رجوع کنید).

شیشه‌ها. سیلیکاتها، شیشه‌های تجارتي اصلی‌اند، که شامل چهاروجهی SiO_4 ذکر شده در بخش قبل، به اضافه برخی یونهای اصلاح‌کننده‌اند. این شیشه‌ها، بی‌شکل یعنی غیر بلوری‌اند. در شکل ۸-۵-۳ ساختار بلوری با ساختار جامد بی‌شکل مقایسه شده است. در هر دو اولین اتمهای همسایه یکسان‌اند یعنی هر اکسیژن بین دو اتم سیلیسیم قرار گرفته است و دو چهاروجهی را به هم پل می‌زند. هر سیلیسیم بین چهار اکسیژن واقع است (اکسیژن چهارم بالا یا پایین صفحه کاغذ قرار دارد و دیده نمی‌شود). ولی در شیشه تفاوتها از همسایه‌های دورتر ناشی می‌شوند، شیشه برخلاف سیلیس بلوری الگویی با نظم پراکنده ندارد.

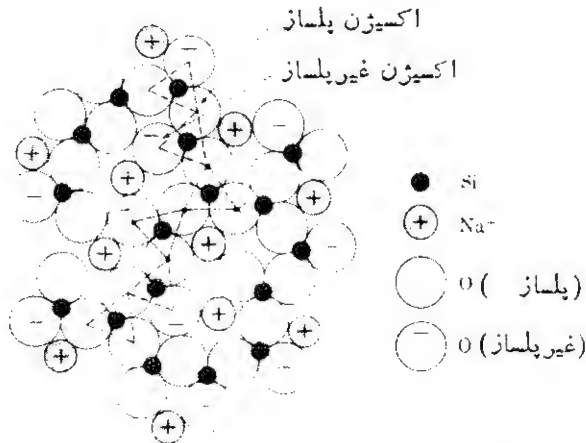
هرگاه فقط سیلیس (SiO_2) وجود داشته باشد و هر اکسیژن به صورت پل، دو چهار وجهی را به هم مربوط کند، شیشه بسیار صلب خواهد بود. مثلاً سیلیس مذاب حتی در گستره دماهایی که مایع واقعی است فوق‌العاده ویسکوز است. به اصطلاح پلی‌مری، واحدهای آن چندعاملی و ساختار شبکه آن اتصالات متقاطع زیادی دارد. به دلیل کم بودن انبساط گرمایی، سیلیس مذاب کاربردهای زیادی دارد ولی به دلیل ویسکوزیته زیاد، شکل دادن آن بسیار سخت است.

اصلاح‌کننده‌های ساختار مشبك. بیشتر شیشه‌های سیلیسی شامل اصلاح‌کننده شبکه‌اند. این مواد اکسیدهایی چون CaO و Na_2O هستند که در ساختار، کاتیون (یون مثبت) به وجود می‌آورند. مطابق با شکل ۸-۵-۴، اضافه کردن Na_2O به شیشه دویون Na^+ و دو اکسیژن غیرپلساز، که هر کدام يك بار منفی دارند، به وجود می‌آورد. این اکسیژنها فقط

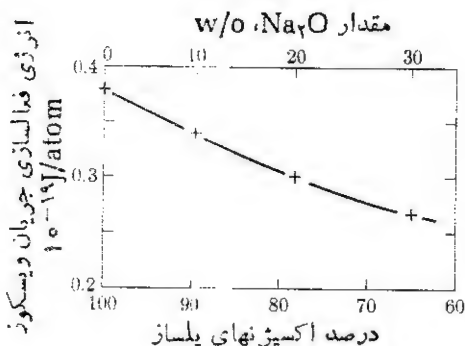


شکل ۳-۵-۸ نمایش دوبعدی (الف) شیشه سیلیسی و (ب) سیلیس بلوری در دمای اتاق. هر دو ساختار مشبك به‌انظم كم دامنه دارند. فقط سیلیس بلوری ترتیب شبكه‌ای به‌انظم یر دامنه دارد. (اکسیژن چهارم بالا یا پایین اتم سیلیسیم قرار می‌گیرد و در اینجا نشان داده نشده است). اکسیژن بین چهار وجهیهای مجاور به‌عنوان كل عمل می‌کند.

به يك اتم سیلیسیم متصل‌اند و به همین ترتیب اضافه کردن يك یون Ca^{2+} نیز دو اکسیژن غیر پلساز به وجود می‌آورد. وجود این اکسیژنهای غیر پلساز انرژی فعالسازي لازم برای اتم، در حرکتي که موجب روان شدن شیشه مذاب می‌شود، را کاهش می‌دهد. این مطلب در شکل ۵-۵-۸ در مورد شیشه‌ها برای افزایش مقدار Na_2O (و بنا بر این افزایش نسبت



شکل ۴-۵-۸ ساختار شیشه سودا سیلیسی. افزودن Na_2O به شیشه سیلیسی تعداد اتمهای اکسیژن پلساز را كم می‌کند. هر اکسیژن غیر پلساز يك بار منفی حمل می‌کند (مطابق با شکل ۳-۵-۸ اکسیژن چهارم هر چهار وجهی، برای سادگی حذف شده است). این شیشه در دماهای بالا از شیشه سیلیسی شکل ۳-۵-۸ (الف) ویسکوزیته كمتری دارد.



شکل ۵-۵-۸ انرژی چریان ویسکوز بر حسب اکسیژنهای پلساز (شیشه‌های $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$). انرژی فعالساز لازم برای چریان ویسکوز با افزایش درصد اتمهای اکسیژن مشترک بین چهار وجهیهای مجاور افزایش می‌یابد.

اکسیژنهای غیر پلساز (دیده می‌شود).

در شیشه‌های تجارتي که حاوی سودا و آهک‌اند کم‌تر از سه چهارم اتمهای اکسیژن به صورت پل بین چهار وجهی SiO_4 قرار گرفته‌اند. بنا بر این بعضی از واحدها مستقیماً فقط به دو چهار وجهی دیگر متصل‌اند. در نتیجه شیشه در دمای بالا گرمانرم است و می‌تواند به صورت محصولاتی مانند حباب لامپ، شیشه پنجره، ورشته‌هایی که در چین سرد شدن سخت می‌شوند شکل داده شود.

هزاران نوع شیشه تجارتي وجود دارد، زیرا بیش‌تر از یک دوجین جزء مختلف وجود دارند که می‌توانند در اندازه‌های مختلف به کار روند و خواص ویژه‌ای مانند شاخص شکست، طیف رنگ، یا ویسکوزیته به وجود آورند. جدول ۵-۸-۱ انواع مهم شیشه‌ها را نشان می‌دهد.

مثال ۵-۸-۱ کسواتر (SiO_2) دارای چگالی 2650 Mg/m^3 (2650 g/cm^3) است. الف) چه تعداد اتم سیلیسیم (اتم اکسیژن) در هر m^3 وجود دارد. ب) در صورتی که شعاع سیلیسیم و اکسیژن به ترتیب 0.038 nm و 0.114 nm باشد ضریب فشردگی چقدر است؟

حل:

$$\begin{aligned} \text{الف)} \quad \text{SiO}_2/\text{m}^3 &= \frac{2650 \times 10^6 \text{ g/m}^3}{(28.1 + 32.0) \text{ g} / (0.06 \times 10^{24} \text{ SiO}_2)} \\ &= 2645 \times 10^{28} \text{ SiO}_2/\text{m}^3 \\ &= 2645 \times 10^{28} \text{ Si/m}^3 = 529 \times 10^{28} \text{ O/m}^3 \end{aligned}$$

جدول ۸-۵-۱ انواع شیشه‌های معمولی تجاری

اجزای اصلی، درصد وزنی

خواص لازم	MgO	B _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	CaO	Na _۲ O	SiO _۲	نوع
دوام زیاد	۲		۱	۱۰	۱۴	۷۲	پنجره
دوام زیاد			۱	۱۳	۱۳	۷۳	شیشه جام (معماری)
کارپذیری آسان، مقاومت شیمیایی	۲		۱	۵	۱۵	۷۲	مخزن
کارپذیری آسان	۲		۱	۵	۱۶	۷۲	حباب لامپ
خاصیت فلیایی کم	۲	۱۰	۱۴	۱۶		۵۲	رشته (برق)
انبساط گرمایی کم، تبادلی بونی کم		۱۲	۲		۴	۸۱	پیرکس
انبساط گرمایی خیلی کم						۹۹	سایس ذوب‌شده

$$\frac{V_{Si}}{m^3} = (2.645 \times 10^{28} / m^3) \left(\frac{4\pi}{3} \right) (0.038 \times 10^{-9} m)^3 = 0.006 m^3 / m^3$$

(ب)

$$\frac{V_o}{m^3} = (5.29 \times 10^{28} / m^3) \left(\frac{4\pi}{3} \right) (0.114 \times 10^{-9} m)^3 = 0.328 m^3 / m^3$$

$$\text{ضریب فشردگی} = 0.33$$

توضیح. اگرچه میزان فضای آزاد در این ساختار قابل ملاحظه است، بیشتر اتمهای تکی (بجز هلیوم) می توانند به صورت یون درمیان SiO_2 نفوذ کنند. بنابراین بارهای آنها مانع از حرکت قابل ملاحظه ای در دمای محیط می شود.

مثال ۴-۵-۸ شیشه ای حاوی ۸۰ درصد وزنی SiO_2 و ۲۰ درصد وزنی Na_2O است. چه کسری از اکسیژن غیر پلساز است؟

حل:

$$100 g = 80 g SiO_2 + 20 g Na_2O$$

$$80 g SiO_2 / [(28.1 + (2 \times 16.0)) g / mole]$$

$$= 1.33 \text{ mole } SiO_2 \text{ یا } 80.6 m/o SiO_2$$

$$20 g Na_2O / [(2 \times 23.0) + 16.0) g / mole]$$

$$= 0.32 \text{ mole } Na_2O \text{ یا } 19.4 m/o Na_2O$$

مول ۱۰۰: مبنای جدید

$$80.6 SiO_2 = 80.6 Si + 161.2 O$$

$$19.4 Na_2O = \frac{19.4 O + 38.8 Na^+}{80.6 Si + 180.6 O + 38.8 Na^+}$$

(با توجه به شکل ۴-۵-۸) دقت کنید که برای هر Na^+ اضافه شده يك اکسیژن غیر پلساز وجود دارد. بنابراین ۳۸.۸ اکسیژن غیر پلساز (و ۱۴۱.۸ اکسیژن پلساز) وجود دارد

$$\text{کسر اکسیژن غیر پلساز} = \frac{38.8}{180.6} = 0.215$$

توضیح. به شیشه سودا - آهکی تجارتی که برای مخازن و... مصرف می شود (جدول ۸-۵-۱)، CaO نیز افزوده شده است. هر یون Ca^{2+} دو اکسیژن غیر پلساز تولید می کنند که هر دو حامل یک بار منفی اند (به شکل ۸-۵-۴ رجوع کنید). ▲

مثال ۸-۵-۳ به شکل ۸-۵-۲ رجوع کنید و آن را با شکل های ۲-۳-۳ (الف) و ۲-۴-۱ (ب)، مقایسه کنید. زاویه پیوند $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 109.5° است. الف) نزدیکترین فاصله بین اکسیژن ها (مرکز به مرکز) چقدر است؟ ب) نزدیکترین فاصله بین سیلیسیم ها چقدر است؟ (در این حالت $\text{CN} = 2$ ، $\text{O}^{2-} \approx 0.114 \text{ nm}$ ، $\text{Si}^{4+} \approx 0.042 \text{ nm}$)

حل:

$$\frac{[\text{O}-\text{Si}-\text{O}]/2}{r+R} = \sin(109.5^\circ/2) = 0.82 \quad \text{الف)}$$

$$\text{O}-\text{Si}-\text{O} = 2 \left[\frac{0.042 \text{ nm}}{1.11} + 0.114 \text{ nm} \right] [0.82] = 0.25 \text{ nm}$$

ب) فرض کنید که زاویه $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ، 180° باشد (شکل ۸-۵-۲)

$$\text{Si}-\text{Si} = 2 \left[\frac{0.042 \text{ nm}}{1.11} + 0.114 \text{ nm} \right] = 0.30 \text{ nm}$$

توضیح. در بعضی از چندشکلی های سیلیس، برای آنکه الکترون های تنها به دست آیند، زاویه پیوند $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ به کمتر از 180° کاهش می یابد. ▲

۸-۶ رفتار الکترومغناطیسی سرامیک ها

سرامیک ها به خاطر کاربردشان به عنوان عایق الکتریکی به خوبی شناخته شده اند. (شکل ۸-۶-۱). علاوه بر این سرامیک های مختلف به علت بسا بودن ثابت های دی الکتریک، اثرات پیزوالکتریک، یا رفتار دی الکتریک آنها ممکن است نقش های مختلفی در مدار های الکترومغناطیسی داشته باشند. بالاخره، اکسید بیشتر عناصر انتقالی نیم رساناست.

سرامیک های دی الکتریک. بسیاری از اکسید ها را می توان به عنوان عایق های خوبی به کار برد زیرا الکترون های ظرفیتی اتم فلز به طور دائمی به اتم های اکسیژن انتقال می یابند و یون O^{2-} به وجود می آورند. باردیگر به سراغ عایق شمع اتومبیل شکل ۲-۷-۳ می رویم. یون های Al^{3+} موجود در Al_2O_3 الکترون های ظرفیتی خود، که حامل بار در آلومینیم فلزی اند، را از دست داده اند. این الکترون ها در حال حاضر توسط یون های اکسیژن



شکل ۸-۶-۱ شکست سطحی، رطوبت و ذرات آلوده جذب شده، موجب ایجاد مسیری در سطح، برای اتصال الکتریکی می‌شوند.

نگه داشته شده‌اند. در دیگر مواد عایق، یونهای Mg^{2+} در MgO الکترون خود را به یونهای O^{2-} می‌دهند و در چهار وجهی SiO_4 سیلیسیم و اکسیژن به سرعت الکترون به اشتراک می‌گذارند (شکل ۸-۵-۱). در نتیجه ترکیب $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ بعضی از بهترین عایقها را به وجود می‌آورد.

ولی موادی که معمولاً عایق به شمار می‌آیند ممکن است تحت ولتاژهای بسیار بالا این خاصیت خود را از دست بدهند. این پدیده معمولاً سطحی است. مثلاً شمع اتومبیل ممکن است به دلیل رطوبت صحگاهی اتصالی کند زیرا رطوبتی که روی سطح عایق سرامیکی جمع شده، موجب اتصال کوتاه در شکاف شمع می‌شود. به این دلیل عایقها طولیتر طرح می‌شوند (شکل ۸-۶-۱ را ببینید). تا امکان اتصال سطحی کم شود. همچنین آنها را لعاب می‌دهند تا خاصیت جذب کنندگی در آنها از بین برود، زیرا تخلخل داخلی و ترکها فرصتی برای صدمه دیدن بیشتر «سطح» را فراهم می‌آورند. فقط هرگاه گرادیان ولتاژ فوق العاده زیاد باشد، فرود ریزش حجمی ظاهر می‌شود. میدان الکتریکی بسیار قوی برای گسیختن دو قطبیهها در عایقها کافی است و هنگامی که شدت میدان از قدرت پیوندها تجاوز کند، تخلیه صورت می‌گیرد.

خواص دی الکتریکی برخی از عایقهای سرامیکی در جدول ۸-۶-۱ ذکر شده

جدول ۸-۱۰ خواص سرامیکهای دی الکتریک

ضریب افت، tan δ	ثابت دی الکتریک نسبی، K	استحکام دی الکتریک، volts/mm	ضریب مقاومت (حجم)، ohm·m	ماده
۱۰ ^۹ Hz	۶۰ Hz	۱۰ ^۹ Hz	۶۰ Hz	
—	۰.۰۱۰	—	۶	۲-۸ × ۱۰ ^۴
۰.۰۰۳	۰.۰۰۵	۶	۶	۸-۱۵ × ۱۰ ^۴
۰.۰۰۱	۰.۰۳۵	۸	۹	۱۰-۱۵ × ۱۰ ^۴
< ۰.۰۰۰۵	—	۹	—	۱۰ ^۴
۰.۰۰۱	۰.۰۱	۷	۷	۱۰ ^۴
۰.۰۰۰۴	—	۴	—	—
۰.۰۰۰۰۱	۰.۰۰۰۱	۳.۸	۴	۱۰ ^۴
				~ ۱۰ ^{۱۸}
				چینی الکتریکی
				عایقهای استینایت
				عایقهای زیر کونیم
				عایقهای آلومین
				نیشه سودا - آهکی
				نیشه E
				سیلیس ذوب شده (SiO _۲)

است. استحکام دی الکتریک عبارت از گرادیان ولتاژی است که موجب فرو ریزش الکتریکی در عایق می شود. ثابت دی الکتریک نسبی، κ ، را می توان با داده های مشابهی که برای پلاستیکها در جدول ۶-۱-۶ آمده است، مقایسه کرد. در مجموع این مقادیر در سرامیکها اندکی بیشتر است زیرا به جای دو قطبهای مولکولی یوننها تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می گیرند. همان طور که برای عایقهای پلی مری صادق است، ثابت دی الکتریک به سادگی حساس است ولی در دماهای عادی، عایقهای سرامیکی تغییر کمتری را نشان می دهند. به هنگام طرح یک مدار الکتریکی ضریب افت، $\tan \delta$ ، برای مهندس برق حائز اهمیت است. مقدار انرژی مصرف شده در یک خازن با جریان a-c عبارت است از حاصل ضرب ثابت دی الکتریک نسبی در ضریب افت. $\kappa \tan \delta$ ، بنا بر این آلومین یا شیشه هایی که برای مصارف الکتریکی طراحی می شوند (شیشه های E) برای استفاده در گستره های مگاهرتز انتخاب می شوند.*

فیمرساناهای سرامیکی. اگرچه ترکیبات سرامیکی اسماً عایق اند ولی هرگاه حاوی عناصر واسطه چند ظرفیتی باشند، «فیمرسانا» خواهند شد، در شکل ۵-۵-۴ (الف) نشان داده شد که حفره های الکترونی با حرکت از یک یون نیکل به دیگری بار حمل می کنند. ماگنتیت (Fe_3O_4 یا $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$) فیمرسانای سرامیکی با مقاومت ویژه 10^{-2}ohm-cm است، که با گرافیت و قلع خاکستری قابل مقایسه است. (شکل ۵-۱-۱) منشأ رسانندگی همان است که در مورد NiO در شکل ۵-۵-۴ (الف) گفته شد، اگرچه نسبت یونهای Fe^{3+} زیادتر است، زیرا تعداد حفره های الکترونی که بار حمل می کنند بیشتر است. مقاومت ویژه را می توان به وسیله ایجاد محلولهای جامد افزایش داد. به این ترتیب که یونهای دیگری جایگزین یونهای آهن شوند. جدول ۸-۶-۲ این افزایش را برای محلولهای جامد MgCr_2O_4 و FeFe_2O_4 نشان می دهد. هیچکدام از یونهای Mg^{2+} و Cr^{3+} روی الکترونها یا حفره های الکترونی اثری ندارند و بنا بر این مقاومت ویژه را می توان به میزان دلخواه تنظیم کرد؛ نکته قابل توجه دیگر از نظر مهندسی ضریب گرمایی مقاومت برای این فیمرساناهاست. مطابق جدول ۸-۶-۲ این تغییر مقاومت بیشتر از $1^\circ\text{C}^{-1}\%$ است و در محلولهای جامد دیگر ممکن است تا $4^\circ\text{C}^{-1}\%$ برسد. این حساسیت برای اندازه گیری دقیق دما کافی است و دستگاههایی بنام ترمیستود با استفاده از آن برای اندازه گیری دما ساخته شده است. چون ضریب گرمایی مقاومت ویژه ترمیستورها منفی است، می توان آنها را در برخی مدارها نیز به کار برد تا تغییر مقاومت مثبت اجزای فلزی مدار را جبران کند.

* سیلیس ذوب شده می تواند به علت بالا بودن ویسکوزیته بسیار مطلوب باشد. بجز آنکه بخاطر ویسکوزیته بالا، انجام فرایند بر روی آن دشوار است.

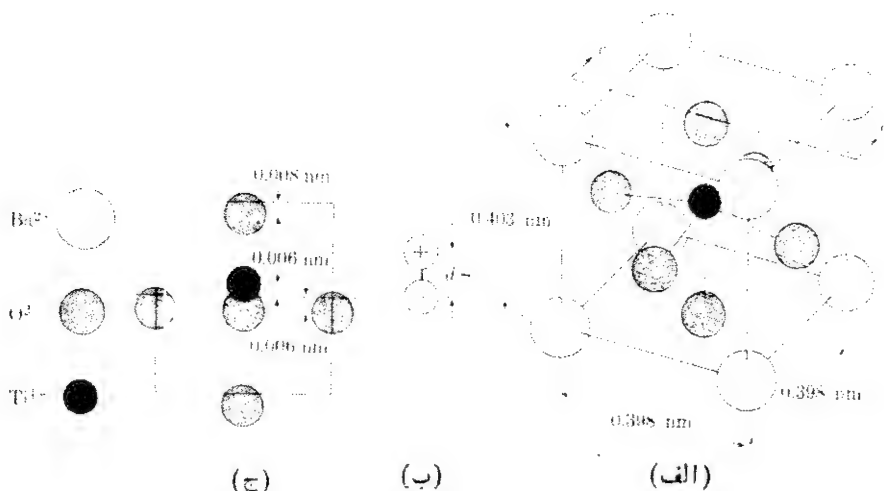
جدول ۸-۶-۲ مقاومت ویژه نیم رساناهای سرامیکی

$\Delta\rho/\Delta T$	مقاومت ویژه، $\Omega\cdot m$	ترکیب، درصد مول		
$\%/^{\circ}C$	$60^{\circ}C$	$25^{\circ}C$	$MgCr_2O_4$	$FeFe_2O_4$
-۰.۳	۰.۰۰۰۰۰۴۵	۰.۰۰۰۰۰۵	۰	۱۰۰
-۱.۰	۰.۰۰۰۴۵	۰.۰۰۰۷	۲۵	۷۵
-۱.۶	۰.۰۷۵	۱.۸	۵۰	۵۰
-۲.۰	۱.۲۰۰	۲.۲۰۰	۷۵	۲۵
-	$>10^1$	$>10^2$	۱۰۰	۰

سرامیکهای پیرو الکتریک. بعضی از بلورهای سرامیکی مرکز تقارن ندارند. در اینجا جنبه‌های بلور شناختی آنها را در نظر نمی‌گیریم ولی وقتی شامل بلورهای یونی شوند اثر مهم آن را مدنظر قرار می‌دهیم. مراکز بارهای مثبت و منفی یکسان نیستند در نتیجه سلول واحد مانند دوقطبی الکتریکی کوچکی، با دو انتهای مثبت و منفی، عمل می‌کند. این مطلب در $BaTiO_3$ مشهود است. مطابق شکل ۸-۴-۱ ساختار $BaTiO_3$ در بالای $120^{\circ}C$ مکعبی است. پایین این دما در نقطه‌ای به نام نقطه کودی تغییر مکان اندک ولی مهمی در یونها اتفاق می‌افتد. یون Ti^{4+} مرکزی به اندازه $0.06 nm$ نسبت به یونهای Ba^{2+} تغییر مکان می‌یابد و یونهای O^{2-} در جهت عکس تغییر مکان پیدا می‌کنند، مطابق با شکل ۸-۶-۲. بدین ترتیب مراکز بارهای مثبت و منفی به اندازه طول دوقطبی، d ، از یکدیگر فاصله می‌گیرند.

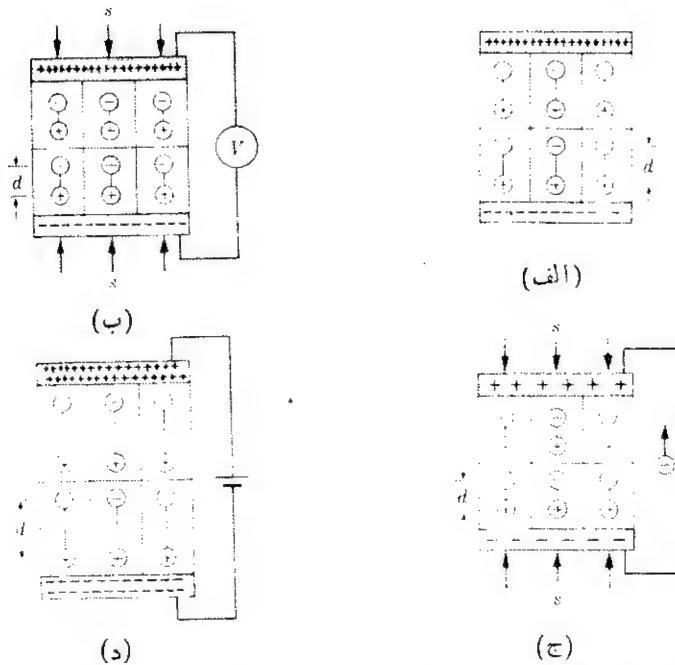
موادی مثل $BaTiO_3$ هنگامی که در میدان الکتریکی قرار گیرند ابعادشان تغییر می‌کند زیرا بارهای منفی به طرف الکتروود مثبت و بارهای مثبت به سمت الکتروود منفی کشیده می‌شوند و طول دوقطبی، d ، افزایش می‌یابد. این امر همچنین موجب افزایش گشتاور دوقطبی Qd و قطبش P ، می‌شود زیرا اقطبش مجموع گشتاورهای دوقطبی، Qd ، در واحد حجم، V ، است (رابطه ۷-۶-۱). اثرات بالا وسیله‌ای برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و برعکس

* شکل ۸-۶-۲ تغییر مکان یون Ti^{4+} به طرف بالا را نشان می‌دهد. این تغییر مکان در هر یک از شش جهت مختصات می‌تواند صورت گیرد و در هر صورت حرکت یونهای O^{2-} در جهت مخالف خواهد بود.



شکل ۸-۶-۲ ساختار چهاروجهی BaTiO₃. بالای ۱۲۰°C (۲۵۰°F) ساختار BaTiO₃ مکعبی است (۸-۴-۱) و پایین این دما یونها نسبت به یونهای گوشه Ba^{۲+} تغییر مکان می‌یابند، چون یونهای Ti^{۴+} و O^{۲-} در جهت عکس تغییر مکان می‌یابند مراکز بارهای مثبت و منفی جدا خواهند بود و سلول واحد، غیر مکعبی می‌شود.

است. برای درک این مطلب به شکل ۸-۶-۳ (الف) مراجعه کنید. منظم قرار گرفتن دوقطیبه‌ها در بسیاری از سلولهای واحد موجب قطبش می‌شود. به طوری که بارهای مثبت در یک طرف بلور و بارهای منفی در طرف دیگر آن جمع می‌شوند. اکنون دو موردی را که شکلهای ۸-۶-۳ (ب) و ۸-۶-۳ (د) نشان می‌دهند، در نظر بگیرید. (۱) بلور را با تنش σ فشار دهید (یا بکشید) کرنش e به وجود می‌آید که به وسیله مدول کشسانی قابل تعیین است. این کرنش طول دوقطبی d را تغییر می‌دهد و مستقیماً روی قطبش اثر می‌گذارد ($= \sum Qd/V$)، زیرا Q و V اساساً ثابت باقی می‌مانند. با قطبش کمتر (در مورد اعمال فشار) در دو طرف بلور چگالی بار افزایش می‌یابد. اگر دوانتهای آن جدا از هم باشند، اختلاف پتانسیلی به وجود می‌آید [شکل ۸-۶-۳ (ب)]. اگر اتصال الکتریکی وجود داشته باشد الکترون‌ها از یک انتها به طرف دیگر جریان می‌یابند. (۲) در شکل ۸-۶-۳ (د) فشاری اعمال نشده، به جای آن ولتاژی اعمال شده است که چگالی بار را در دو انتها افزایش می‌دهد. بارهای منفی درون BaTiO₃ به یک طرف کشیده می‌شوند و بارهای مثبت به سمت مخالف، بنابراین نه تنها طول دوقطبی d را تغییر می‌دهند، بلکه ابعاد بلور را نیز عوض می‌کنند. این دو وضعیت نشان می‌دهند که چگونه نیروهای مکانیکی و ابعاد یا بارهای الکتریکی و یا ولتاژ تغییر می‌کند. ادواتی که چنین کاراییهایی دارند ترانسدیسور نامیده می‌شوند. موادی با خصوصیات فوق را پیزوالکتریک یعنی فشار-الکتریک می‌نامند. بلورهای



شکل ۸-۶-۳ ماده پیزوالکتریک. میدان الکتریکی ایجادکننده تغییر بعد در قسمت (د) نشان داده شده است برعکس، کرنش حاصل از فشار موجب تغییر در ولتاژ می شود (ب).

نوع BaTiO_3^* برای سنجش های فشار، صفحه های گرامفون و مولدهای صدا بسا بسامد بالا به کار می روند. مثلاً کاربرد ریج گرامفون سرامیکی را در نظر می گیریم. سوزن گرامفون شیار روی صفحه را طی می کند. ترانسدیوسر کوچکی با سوزن در تماس است و نوسانات به وجود آمده در شیار را نشان می دهد. هم بسامد و هم دامنه را می توان به وسیله تغییر ولتاژ احساس کرد [شکل ۸-۶-۳ (ب)]. اگر چه سیگنال ولتاژ کوچک است، آن را می توان توسط مدار الکترونیکی تقویت کرد تا بتواند با بلندگو شنیده شود.

بلورهای کوارتز (SiO_2) نیز پیزوالکتریکی اند و برای مصارف ویژه ای در مدارهایی که کنترل بسامد لازم است به کار می روند (شکل ۸-۶-۴). هنگامی که چنین بلوری بدین شکل خاص هندسی برش داده شود بسامد ارتعاشات کشان ثابتی خواهد

* سرامیکهای پیزوالکتریکی که معمولاً به کار می روند، محلولهای جامد $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ هستند که PZT نامیده می شوند. ساختار آنها همان ساختار BaTiO_3 در شکل ۸-۶-۲ است. ولی نقطه کوری آنها بیشتر از BaTiO_3 و گستره کاربرد آنها در طراحی وسیعتر است.



شکل ۸-۶-۴ بلورهای پیزوالکتریک (کوارتز). این بلورها به طور مصنوعی ساخته شده اند و به عنوان تشدیدکننده برای کنترل بسامد به کار می روند. به هنگام ارتعاش کشان کوارتز، میدان الکتریکی متقابلاً و با همان بسامد پاسخ خواهد داد و بر عکس.

داشت، تغییراتش يك در 10^8 است! بنابراین در حالت تشدید، چنین بلوری می تواند بسامد مدار الکترونیکی را با همان دقت کنترل کند. مدارهای ظریف ساعت و مدارهای کنترل امواج رادیو، دو موردی اند که در آنها بلورهای کوارتز به عنوان مواد پیزوالکتریکی به کار می روند.

□ **سرامیکهای مغناطیسی.** آهنرباهای فلزی در مدارهای UHF و VHF زیان آورند. بسامدهای بالا، جریانی را القا می کنند و بنابراین موجب اتلاف توان در هسته های فلزی می شوند. در حقیقت از این القا کنندگی در متالورژی برای ذوب کردن آلیاژهای مرغوب استفاده می شود. این اتلاف توان به صورت گرما ممکن است به مدار الکترونیکی صدمه وارد کند.*

• این مشکل مدارهای ۶۰-Hz را می توان با به کار بردن اجسام لایه لایه به جای هسته یکپارچه در مبدلها، آرمیچرها و ... رفع کرد و در این صورت مقاومت مؤثر زیاده می شود. به علاوه در مدارهای بسامد بالا، این لایه ها باید بسیار نازک باشند.

خوشبختانه ترکیبات سرامیکی می‌توانند هم مغناطیسی و هم نارسا باشند. اگر یک اتم آهن را در نظر بگیریم (رابطه ۱-۱-۲) مشاهده می‌کنیم که هر اتم آهن شش الکترون $3d$ دارد. این برای یون فرو (Fe^{2+}) نیز صادق است. (رابطه ۲-۱-۲) ولی هر یون فریک (Fe^{3+}) پنج الکترون $3d$ دارد (رابطه ۳-۱-۲). اسپین این الکترونها در پنج ارییتال $3d$ به این ترتیب است

$$Fe^{2+}: \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad (1-6-8)$$

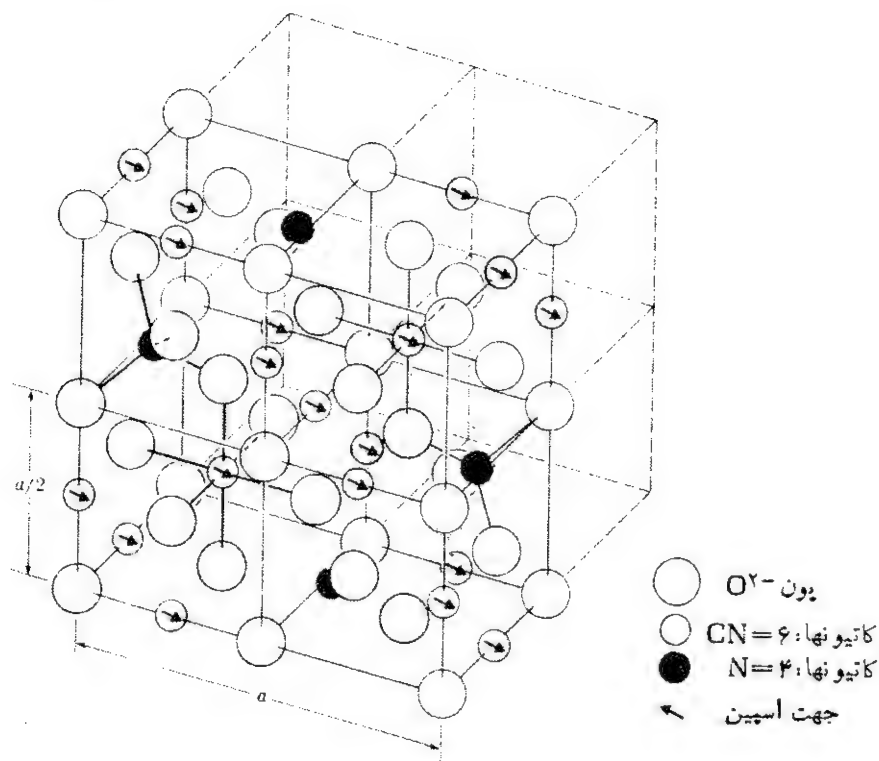
$$Fe^{3+}: \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad (2-6-8)$$

و این بدان معنی است که در هر Fe^{2+} به دلیل وجود چهار اسپین الکترون جفت نشده، بی‌توانی مغناطیس وجود دارد (به نام چهار مگنتون بوهر خوانده می‌شود) چون گشتاور مغناطیسی هر اسپین الکترون برابر $9.27 \times 10^{-24} \text{ amp} \cdot m^2$ است، کل گشتاور مغناطیسی هر یون Fe^{2+} برابر $37 \times 10^{-24} \text{ amp} \cdot m^2$ خواهد بود. هر یون Fe^{3+} دارای بی‌توانی برای پنج مگنتون بوهر و گشتاور مغناطیسی برابر $46.3 \times 10^{-24} \text{ amp} \cdot m^2$ است.

بسیاری از فازهای سرامیکی از گروه $A_m B_n X_p$ بخش ۸-۴ هستند مانند $Ni_8 Fe_{16} O_{32}$ (ماگنتیت یا $Fe_3 O_4$ یا $Fe_2^{2+} Fe_2^{3+} O_4$)، سلول واحد آنها در شکل ۵-۶-۸ دیده می‌شود. ساختار آن پیچیده است ولی با توجه به اینکه یونهای O^{2-} آرایش fcc دارند، ساده می‌شود. در مقایسه با آنچه که در شکلهای ۱-۱-۳ و ۲-۲-۸ نشان دادیم، ابعاد این سلول واحد دو برابر است. در نتیجه در هر سلول واحد $[Fe^{2+} Fe^{3+} O_4]_8$ ۳۲ یون اکسیژن، ۱۶ یون فریک، ۸ یون فرو وجود دارد. کاتیونهای آهن در مکانهای بین نشینی ۴ گانه و ۶ گانه قرار می‌گیرند (شکل ۲-۲-۸). تمام آنهایی که در مکانهای ۴-f قرار دارند ($CN=4$) دارای گشتاور مغناطیسی در یکی از جهات $\langle 111 \rangle$ و آنهایی که در مکانهای ۶-f قرار دارند، دارای گشتاور مغناطیسی در جهت مخالف $\langle 111 \rangle$ هستند. بررسی بیشتر نشان می‌دهد که ۱۶ یون Fe^{2+} در هر سلول واحد در مکانهای ۴-f و ۶-f به تساوی قرار گرفته‌اند. بنابراین گشتاور مغناطیسی خالص یونهای Fe^{3+} صفر است

$$(\downarrow 5 \text{ در هر یون}) (8 \text{ یون } Fe^{3+}) + (\uparrow 5 \text{ در هر یون}) (8 \text{ یون } Fe^{3+}) = 0 \quad (3-6-8)$$

ولی تقریباً تمام یونهای Fe^{2+} در مکانهای ۶-f قرار می‌گیرند و چون هر یون از $8 Fe^{2+}$ چهار مگنتون بوهر، β ، دارد هر کدام برابر با $9.27 \times 10^{-24} \text{ amp} \cdot m^2$ ، گشتاور مغناطیسی هر سلول واحد برابر 32β یا تقریباً $3 \times 10^{-21} \text{ amp} \cdot m^2$ است. از آنجا که ثابت شبکه سلول واحد 0.37 nm و اشباع مغناطیسی M_s برابر است با بیشینه گشتاور مغناطیسی در واحد حجم، می‌توان اشباع مغناطیسی $Fe_3 O_4$ را به صورت زیر محاسبه کرد



شکل ۵-۶-۸ ساختار فیرواسپینل. یونهای O^{2-} آرایه fcc تشکیل می‌دهد و کاتیونها در محلهای بین‌نشینی نشان داده شده، قرار می‌گیرند (فقط نیمهٔ رو برویی سلول واحد رسم شده است). ابعاد سلول دو برابر ساختارهای AX است (شکل ۲-۲-۸). گشتاور مغناطیسی این کاتیونها در مکانهای ۴-f و ۶-f ترتیب خلاف یکدیگر دارند. از آنجا که گشتاور مغناطیسی در جهت اسپین برابر نیست، هر سلول واحد گشتاور مغناطیسی خالصی دارد.

$$M_s = \frac{0.3 \times 10^{-21} \text{ amp} \cdot \text{m}^2}{(0.837 \times 10^{-9} \text{ m})^3} = 0.5 \times 10^6 \text{ amp/m}$$

و این با مقدار تجربی آن یعنی $0.53 \times 10^6 \text{ amp/m}$ برابر است.

□ آهنرباهای نرم و سخت. به محض آنکه میدان مغناطیسی برداشته شود، بیشتر خاصیت مغناطیسی Fe_3O_4 از بین می‌رود. این از بین رفتن به علت آن است که آرایش مغناطیسی یکایک آنها باقی نمی‌ماند. از این نوع رفتار «مواد نرم» در ترانسفورماتور یا دریوخ

مغناطیسی لامپ تصویر تلویزیون استفاده می‌شود، زیرا به جریان متناوبی حدود 60 Hz در خطوط انتقال نیرو، یا در گستره MHz برای تلویزیون پاسخ می‌دهد. در آهنربای «سخت» یا دائمی پس از برداشتن میدان مغناطیسی خاصیت مغناطیسی باقی می‌ماند. در موقعیتهای بسیاری این خاصیت مطلوب است. از این خاصیت نه تنها برای آهنرباهای دائمی کوچک معمولی که در خانه و مغازه‌ها به کار می‌روند استفاده می‌شود، بلکه قسمتهایی از میلیونها موتور الکتریکی، پرکننده‌های مغناطیسی که در دربندهای در بخالها استفاده می‌شود و پوشش نوارهای ضبط صوت و کاستهای ویدئو را نیز شامل می‌شود. برای درک تفاوت بین آهنرباهای «نرم» و «سخت» اول باید مفهوم حوزه را دریافت. حوزه قسمتی از بلور است که در آن تمام گشتاورهای مغناطیسی متفقاً ردیف شده‌اند. یعنی این حجم کوچک داخل دانه، آهنربای کوچکی با جهتگیری مغناطیسی مخصوص به خود است. حوزه‌هایی که به‌طور مطلوب جهتگیری کرده‌اند هنگامی که در میدان مغناطیسی قرار گیرند رشد می‌کنند و سایرین منقبض می‌شوند. رشد به وسیله حرکت دیواره‌های حوزه صورت می‌گیرد. در آهنربای «نرم» پس از برداشتن میدان، دیواره برمی‌گردد و جهتگیری مغناطیسی به هم می‌خورد و خاصیت مغناطیسی خالصی باقی نمی‌ماند. در آهنربای «سخت» لازم است میدان مغناطیسی معکوسی اعمال شود تا حوزه‌هایی با جهت مخالف به وجود آیند.* همان‌طور که گفته شد، هر نوع تغییری در جهتگیری، از حرکت دیواره‌های بین حوزه‌های مجاور حاصل می‌شود.

خصوصیات ساختاری، مقدار میدان معکوسی، که برای حرکت دیواره‌های حوزه لازم است، را معین می‌کند. این دیواره‌ها نمی‌توانند از مرز دانه‌ها عبور کنند. نابجاییها و سایر عیوب بلوری جلوی حرکت آنها را می‌گیرند. بنابراین فولاد کرنش سختی شده نیز از نظر مغناطیسی فولاد «سخت»، یعنی آهنربای دائمی است، مگر آنکه در معرض میدان وادارنده قویبی، H_c ، قرار گیرد. آهنربای آلنیکو میکروساختار «دوفازی» بسیار ریزی دارد. دیواره‌های حوزه نمی‌توانند از مرز «فازها» عبور کنند؛ بنابراین آهنربای آلنیکو دائمی است. آهنربایی که حاوی ذرات فوق‌العاده ریز آهن دائمی است، زیرا هر ذره کوچک حوزه مجزایی به حساب می‌آید؛ بنابراین میدان معکوس باید به حدی قوی باشد که به جای اینکه فقط مرزها را حرکت دهد، حوزه‌های جدیدی نیز در داخل ذره به وجود آورد.

مثال ۸-۶-۱ برای ایجاد یک لایه شیشه سیلیسی (SiO_2) روی سطح، سیلیسیم به اندازه $25\text{ }\mu\text{m}$ اکسید شده است و سپس با آلومینیم پوشش داده شده است. در بسامد 10^6 هرتز، ظرفیت این لایه را با لایه‌ای از پلی اتیلن (PE) به ضخامت 2-mil ($50\text{ }\mu\text{m}$) که با

* نیروی وادارنده H_c ، مقدار میدان معکوسی است که برای برگرداندن مغناطیس خالص به صفر، لازم است.

آلومینیم پوشش - بخار داده شده است مقایسه کنید.

حل: با استفاده از رابطه (۷-۴-۱) و داده‌های جدولهای ۷-۶-۱ و ۸-۶-۱

$$\frac{C_{PE}}{C_{SiO_2}} = \frac{23(885 \times 10^{-12} C/V \cdot m) A / (50 \times 10^{-6} m)}{328(885 \times 10^{-12} C/V \cdot m) A / (25 \times 10^{-6} m)}$$

▲ $= 0.3$

مثال ۸-۶-۲ در اکسید نیکل [شکل ۵-۵-۴ (الف)] معمولا تعداد یونهای Ni^{3+} محدود است ($Ni^{3+}/Ni^{2+} < 10^{-4}$). وقتی Li_2O به NiO اضافه می‌شود، یونهای Ni^{2+} بیشتری اکسید و به Ni^{3+} تبدیل می‌شوند و جفت $Li^+ Ni^{3+}$ جانشین دویون قبلی Ni^{2+} می‌شود. وقتی مقدار Li_2O به ۱ درصد برسد چه مقدار حامل بار در هر m^3 وجود دارد (NiO همان ساختار $NaCl$ را دارد).

حل: 100 amu را به عنوان مبنا به کار برید.

$$Li_2O \quad \frac{1 \text{ amu}}{13288 + 16} = 0.0000075 \text{ (یا } 0.000007 Li^+)$$

$$NiO \quad \frac{99 \text{ amu}}{5871 + 16} = 0.00168$$

$$\frac{\text{یونهای اکسیژن}}{100 \text{ amu}} = 0.001$$

با ساختار نوع $NaCl$ ، NiO در هر سلول واحد چهار یون اکسیژن دارد. بنابراین

$$\frac{\text{سلولهای واحد}}{100 \text{ amu}} = \frac{0.001}{4} = 0.00025$$

از آنجا که در هر 100 amu ، $0.00075 Li^+$ وجود دارد، $0.00075 Ni^{3+}$ وجود خواهد داشت، و بنابراین در هر 100 amu ، 0.00075 حامل نوع P وجود دارد

$$\frac{\text{حامل } 0.00075 / 100 \text{ amu}}{\text{سلول واحد } 0.00025 / 100 \text{ amu}} = \frac{\text{حامل } 0.00075}{\text{سلول واحد } 0.00025}$$

و چون $r \sim 0.069 \text{ nm}$

$$\frac{\text{حامل } 0.00075}{[2(0.069 + 0.140)10^{-9} \text{ m}]^3} = 2.7 \times 10^{27} / m^3$$

توضیح. می‌توان رسانندگی NiO را به صورت پوشش یک الکترون از یک یون نیکل

به دیگری تجسم کرد. بنابراین با حرکت يك حفره الكترونی از Ni^{2+} به Ni^{3+} ، اتم دومی به صورت Ni^{3+} و اولی به صورت Ni^{2+} درمی آید. ▲

مثال ۳-۶-۸ $BaTiO_3$ قطبش، φ را براساس شکل ۲-۶-۸ و اطلاعات بخش ۷-۶ محاسبه کنید.

حل: در صورتی که مرکز سلول در گوشه های یونهای Ba^{2+} قرار داشته باشد

یون	Q, coul	d, m	$Qd, \text{coul} \cdot \text{m}$
Ba^{2+}	$+2(0.16 \times 10^{-18})$	۰	۰
Ti^{4+}	$+4(0.16 \times 10^{-18})$	$+0.06(10^{-10})$	3.84×10^{-30}
$2O^{2-}$ (دیواره های جانبی سلول)	$-2(0.16 \times 10^{-18})$	$-0.06(10^{-10})$	3.84×10^{-30}
O^{2-} (بالا و پایین)	$-2(0.16 \times 10^{-18})$	$-0.08(10^{-10})$	2.56×10^{-30}
			$\Sigma = 1.024 \times 10^{-30}$

از رابطه (۷-۶-۱)

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{\Sigma Qd}{V} \\ &= \frac{1.024 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}}{4.03 \times 3.98^2 \times 10^{-30} \text{ m}^3} \\ &= 0.16 \text{ coul/m}^2\end{aligned}$$

توضیح. این بدان معنی است که $BaTiO_3$ قطبی شده می تواند چگالی باری برابر 0.16 coul/m^2 ، معادل 10^{12} الکترون / mm^2 داشته باشد. ▲

□ مثال ۴-۶-۸ هر گاه $(2Li^+ + 2Fe^{3+})$ به جای $8Fe^{2+}$ قرار گیرد، ماگنتیت از آنف $Fe_8^{2+}Fe_2^{3+}O_{12}$ (به $Li^+Fe_2^{3+}O_{12}$ تبدیل می شود. با فرض اینکه تغییر ابعاد سلول واحد قابل اغماض باشد و یونهای Li^+ به تساوی در مکانهای f-۴ و f-۶ وارد شوند، اشباع مغناطیسی چند درصد تغییر کرده است؟

حل: ساختار فرو اسپینل دارای ۱۶ کاتیون در مکانهای f-۶ و ۸ کاتیون در مکانهای

۴-f است. O^{2-} و Li^{+} غیر مغناطیسی اند، هر یون Fe^{2+} دارای ۴ β و هر Fe^{3+} دارای ۵ β در هر یون است.)

	۶-f \uparrow	۴-f \downarrow	آرایه fcc
Mag :	$8Fe^{2+} + 8Fe^{3+}$	$8Fe^{2+}$	$32O^{2-}$
LiMag :	$12Fe^{2+} + 2Li^{+}$	$6Fe^{2+} + 2Li^{+}$	$32O^{2-}$

$$\beta_{Mag} = (8)(5\uparrow) + (8)(4\uparrow) + (8)(5\downarrow) = \frac{32\beta}{\text{سلول واحد}}$$

$$\beta_{LiMag} = (12)(5\uparrow) + (6)(5\downarrow) = \frac{20\beta}{\text{سلول واحد}}$$

اگر حجم سلول واحد V باشد

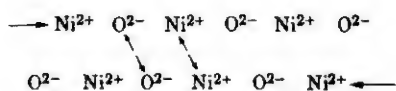
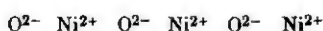
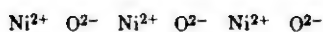
$$\Delta M_s = \frac{(40 - 32)(9.27 \times 10^{-24})/V}{32(9.27 \times 10^{-24})/V} = +25\%$$

۷-۸ رفتار مکانیکی سرامیکها

مواد سرامیکی، به استثنای چند مورد از قبیل خاک رس خمیری، استحکام برشی زیادی دارند، بنابراین انعطاف پذیر نیستند. خواهیم دید که این امر موجب بسا بودن استحکام فشاری و سختی زیادی می شود. به علاوه حساسیت به شکاف زیاد و استحکام شکست آنها کم است.

ترکیبات دارای اتها یا یونهای مختلفی با آرایش منظم اند. این موضوع در بخش ۴-۶ که مطالعه آن اختیاری بود، برای ترکیبات بین فلزی شرح داده شد. در فازهای سرامیکی نیز کاتیونها با آنیونها و آنیونها هم با کاتیونها، کوئوردینانس شده اند (بخش ۲-۸). البته این طبیعی است زیرا یونهای ناهمبند یکدیگر را جذب و یونهای همانند یکدیگر را دفع می کنند. ولی این حالت مطابق با شکل ۷-۸، مانع لغزش می شود. فرایند لغزش برای MgO ، NiO و بلورهای دیگر نوع $NaCl$ (همان طور که رسم شده است) در جهت افقی صورت می گیرد. تغییر آرایش هنگامی انجام می شود که ابتدا پیوندهای قوی مثبت و منفی بین یونهای Ni^{2+} و O^{2-} شکسته شوند، سپس همین که یون Ni^{2+} حرکت کند و به یون O^{2-} بعدی متصل شود، بازه های مثبت باید عبور کنند و چنین موردی در فلزات وجود ندارد.

در NiO محدودیت فوق وجود ندارد و لغزش ممکن است در بعضی از جهتهای دیگر مانند جهت 45° رخ دهد. این لغزش در جهت $\langle 110 \rangle$ ، روی صفحه $\{110\}$ خواهد بود، ولی در این حالت شش سیستم لغزش امکان پذیر است. این حالت با دوازده سیستم لغزش



(ب)

(الف)

شکل ۸-۷-۱ مقایسه فرایندهای لغزش (در فلز نیکل و اکسید نیکل). تغییر مکان یونها در NiO نسبت به اتمهای Ni نیروی بیشتری لازم دارد. نیروهای دافعه قوی بین یونهای همانند اهمیت پیدا می کنند. نیکل بیش از اکسید نیکل سیستم لغزش دارد.

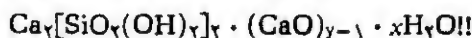
نیکل fcc در $\langle 110 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ قابل مقایسه است (جدول ۶-۴-۱). به علاوه بر سردار لغزش در NiO برابر $\sqrt{2}(r+R)$ ، یعنی ۳ nm و بزرگتر از ۲۵ nm در نیکل است. به این ترتیب عواملی چون (۱) دافعه کوئلی، (۲) تعداد اندک سیستمهای لغزش، و (۳) فاصله تغییر مکان طولانیتر* موجب می شوند که مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیکی در سرامیکهای بلوری نسبت به فلزات سازنده آنها بسیار بیشتر باشد. در مورد فازهای سرامیکی پیچیده تر مانند سیلیکاتها و اسپینل (شکل ۸-۶-۵) یا سیمان پرتلند**، این مقاومت باز هم بیشتر خواهد بود.

سختی. فازهای سرامیکی چون لغزش پلاستیکی انجام نمی دهند غالباً سخت اند. در نتیجه مواد ساخته شده مانند سنباده، حاوی Al_2O_3 است (معمولاً مقداری Fe_2O_3 و یا TiO_2 نیز به صورت محلول جسامد در آن وجود دارد). سیلیسیم کسار بید (SiC) و TiC نیز در سنگ زدن و بریدن فلزات، و فرایندهای تولید مشابه به کار می روند. یکی از شکل های SiC ساختاری از نوع «ZnS» (شکل ۸-۲-۴) دارد. ساختار TiC از نوع «NaCl» (شکل ۸-۲-۳) است.

موارد استثنایی که در سختی سرامیکها دیده می شود می تواند مستقیماً به ساختار آنها مربوط باشد. مثلاً نرم بودن تالک، خاک رس، و میکا به دلیل ساختار ورقه ای آنهاست. زیرا اتمها در هر ورق محکم اند ولی پیوند بین ورقها، فرعی و ضعیف است (بخش ۲-۴).

* انرژی لازم برای حرکت نابجاییها با مربع b متناسب است (رابطه ۶-۴-۲).

** بعضی از شیمی دانها فاز هیدراته سیمان پرتلند را به صورت زیر در نظر می گیرند



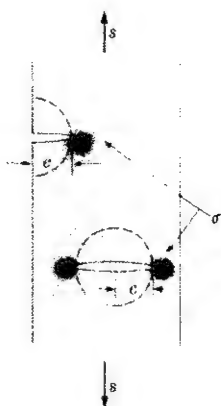
حساسیت به شکاف. شکاف یا ترک تنش افزاست. اثر آن به مراتب بیشتر از اثری است که بر اساس کم شدن سطح مقطع پیش بینی می شود، تنش حقیقی، σ ، در نوک شکاف یا درز (شکل ۸-۷-۲) به تنش کششی اسمی، S ، عمق ترک، c ، و شعاع انحنا، r ، بستگی دارد

$$\sigma = S \sqrt{\frac{c}{r}} \quad (۸-۷-۱)$$

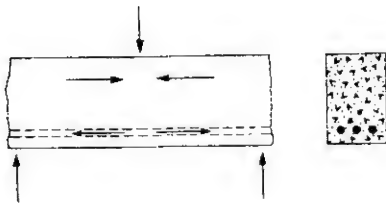
اگر در ماده انعطاف پذیری، σ_c از استحکام تسلیم تجاوز کند، شعاع نوک شکاف آن بیشتر می شود و بدین ترتیب، تمرکز تنش کاهش می یابد. ترک در ماده انعطاف ناپذیر می تواند ابعاد اتمی (مثلاً ۰.۱ nm) داشته باشد. در این صورت هنگامی که اندازه ترک روی سطح به ۰.۱ تا ۱۰ μm ($۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۲}$ میلی متر) می رسد، ضریب تمرکز تنش، σ/S ، ۱۰^۲ یا ۱۰^۳ می شود. ترکهای عمیقتر مهمترند. با آنکه سرامیکها در برش محکم اند، تمرکز تنش σ ممکن است از استحکام پیوند بین اتمها بیشتر شود و ترک شروع به پیشروی کند. این پیشروی عمق ترک، c ، را افزایش می دهد و تمرکز تنش موجود در رابطه (۸-۷-۱) را باز هم بیشتر می کند تا سرانجام شکست فاجعه آمیز رخ می دهد.

مواد سرامیکی (و ترکیبات بین فلزی بخش ۶-۲) به علت مقاومت آنها در برابر برش در نوک ترکها، در کشش ضعیف اند. از طرفی همین عامل یعنی استحکام برشی، آنها را در مقابل فشار قوی می کند. میکرو ترک می تواند نیروی فشاری را تحمل کند بدون آنکه وسعت یابد.

استفاده از مواد انعطاف ناپذیر. رابطه استحکام فشاری زیساد و استحکام کششی کم در سرامیکها برای مهندس طراح بسیار مهم است. بتن، آجر و سایر سرامیکها در درجه اول در محلهای تحت فشار به کار می روند (شکل ۸-۷-۳). هر جا لازم باشد که چنین موادی مانند شیشه، تحت خمش (و در نتیجه بار کششی) قرار گیرند، معمولاً لازم است که ابعاد



شکل ۸-۷-۲ تمرکز تنش ضریب تمرکز تنش به عمق ترک و شعاع انحناى نوک آن بستگی دارد. (رابطه ۸-۷-۱) این مثال برای صفحه تحت است.

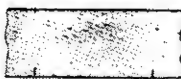


شکل ۸-۷-۳ بتن مسلح. در این تیر بتنی، از ماده انعطاف پذیر در محل های تحت فشار استفاده شده است.

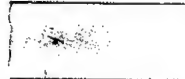
آنها را افزایش دهیم. مثلاً شیشه لامپ تصویر تلویزیون باید حدود ۱۵ میلی متر ضخامت داشته باشد.

چون مواد سرامیکی، تحت فشار قویترند تا تحت کشش، برای مصارفی مانند پنجره عقب اتومبیل و شیشه های در، که در آنها استحکام زیادی لازم است، شیشه بازپخت شده به کار می رود. برای تولید شیشه بازپخت شده، شیشه را تا دمایی که در آن تنش های موجود بین اتمها از بین برود، گرم می کنند و سپس به وسیله جریان هوا یا سا روغن سریعاً آن را سرد می کنند (شکل ۸-۷-۴). به دلیل کاهش دما، سطح شیشه منقبض و صلب می شود، در حالی که مرکز شیشه هنوز گرم است و می تواند ابعاد خود را با انقباض سطح وفق دهد. وقتی که مرکز شیشه سرد و اندکی منقبض شد، روی سطح آن تنش های فشاری (در مرکز آن تنش های کششی) پدید می آید. شکل ۸-۷-۵ مقطع چنین شیشه ای را همراه با تنش های موجود نشان می دهد. به این ترتیب بار زیادی باید اعمال شود تا در سطح شیشه تنش های کششی ایجاد شود و ترک به وجود آید.* در واقع از آنجا که چنین باری ابتدا باید بر تنش های فشاری فایق آید، در مجموع، استحکام شیشه تا حد زیادی افزایش یافته است.

مثال ۸-۷-۱ الف) شش سیستم لغزش {۱۱۰} {۱۲۰} را در MnS (که ساختار $NaCl$ دارد) مشخص کنید؛ ب) طول بردار لغزش در این سیستم های لغزش چقدر است؟



شیشه داغ بدون تنش



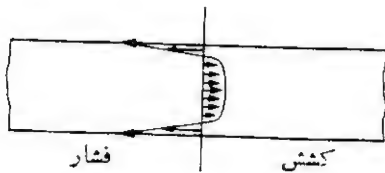
سطح سریعاً سرد و منقبض می شود و مرکز خود را وفق می دهد در نتیجه تنش های جزئی وجود دارند



مرکز سرد و منقبض می شود، سطح تحت فشار و مرکز تحت کشش است

شکل ۸-۷-۴ تغییر ابعاد در شیشه «بازپخت شده».

* اگر ترک از پوسته تحت فشار (مثلاً با خراشیده شدن) به داخل ناحیه تحت کشش که در شکل ۸-۷-۵ دیده می شود نفوذ کند، ممکن است به سرعت و خود به خود گسترش یابد. حاصل این اثر را می توان در شیشه شکسته عقب اتومبیل دید که به جای آنکه به صورت خرده شیشه های تیز باشد به شکل طرح موزائیک است.



شکل ۵-۷-۸ فشار در سطح در شیشه باز پخت شده، نیروی کششی برای به وجود آوردن شکست در سطح نخست باید تنشهای فشاری را خنثی کند.

حل: الف) شکل ۸-۷-۶ صفحه (۱۱۰) را برای ساختار نوع NaCl نشان می‌دهد. هر صفحه فقط يك مجموعه جهات لغزش دارد که در این حالت $[1\bar{1}0]$ یا منفی آن $[\bar{1}10]$ است. از آنجا که در $\{110\}$ شش صفحه وجود دارد، شش سیستم لغزش عبارت‌اند از

$$[1\bar{1}0](110) \quad [1\bar{1}0](101) \quad [1\bar{1}0](011)$$

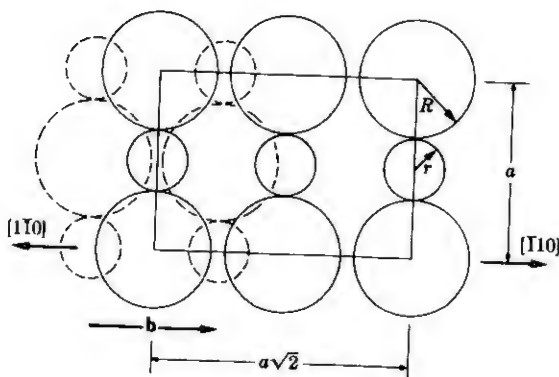
$$[\bar{1}10](110) \quad [\bar{1}10](101) \quad [\bar{1}10](011)$$

ب) از آنجا که

$$r_{Mn}^{2+} = 0.080 \text{ nm} \quad \text{و} \quad R_S^{2-} = 0.182 \text{ nm}$$

$$a = 0.528 \text{ nm}$$

$$b = (0.528 \text{ nm}) \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.373 \text{ nm}$$



شکل ۸-۷-۶ صفحه (۱۱۰) ساختار نوع NaCl. سیستم لغزش (110) $[1\bar{1}0]$ و بردار لغزش b برابر $a/\sqrt{2}$ است. (دایره‌های خط چین مکانهای اتمها در صفحات (110) مشخص شده را نشان می‌دهد. مثال ۸-۷-۱ را ببینید.)

مثال ۸-۷-۲ استحکام شیشه از نظر تئوری از 7000 MPa بیشتر است. استحکامی نزدیک به این مقدار در شیشه به وجود آمده است. قطعه‌ای از این شیشه در اثر کشش خمشی 60 MPa شکسته است. اگر برای نوک ترک ابعادی به اندازه یون اکسیژن فرض شود، عمق ترکی که در این تنش کم موجب شکست شده است چقدر است؟

حل: از رابطه (۸-۷-۱) و با فرض آنکه $r = 0.14 \text{ nm}$ است، داریم

$$c = \frac{r(\sigma/s)^2}{2} = \frac{(0.14 \text{ nm})(7000/60)^2}{2} = 480 \text{ nm}$$

توضیح. ترکهایی به این اندازه در سطوح شیشه‌ای که در محیطهای معمولی وجود دارد نیز مشاهده می‌شود؛ ولی روش ویژه‌ای برای مشاهده آنها لازم است، زیرا این ابعاد نزدیک به حد تفکیک نور مرئی است.

شیشه بازپخت شده مسطح می‌تواند بار بیشتری را تحمل کند، زیرا قبل از آنکه تنشها بر اثر کشش تمرکز یابند، تنش فشاری پوسته (شکل ۸-۷-۵) باید افزایش یابد. ■

□ ۸-۸ فرایندهای مواد سرامیکی

قسمت اعظم محصولات سرامیکی بایکی از دو فرایند عمومی شکل‌دادن ویسکوز یا با تفجوشی به وجود می‌آیند. شکل‌دادن ویسکوز شامل ذوب کردن و شکل‌دادن مایع ویسکوز است. فرایند تفجوشی از ذرات بسیار ریزی که به شکل مطلوب تجمع یافته‌اند آغاز می‌شود که معمولاً پس از آن، محصول پخته می‌شود تا بین ذرات پیوند برقرار شود. فرایند سوم که کاربرد گسترده و لسی و ویژه‌ای دارد، پیوند شیمیایی است، مثل آبدار کردن سیمان پرتلند. این بخش فقط به دو فرایند اول یعنی شکل‌دادن ویسکوز و تفجوشی می‌پردازد. آبدار کردن سیمان همراه بابتن (در بخش ۱۳-۲) بعداً شرح داده می‌شود. در این متن رشد تک بلورها و فرایندهای ویژه دیگر، یا آماده‌سازی مواد مثل خالص کردن یا خشک کردن توسط افشاندن، بررسی نمی‌شود.

شکل‌دادن ویسکوز. شیشه‌های تجارسی با این فرایند ساخته می‌شوند. شیشه اگر گرم شود، به حدی گرم‌تر می‌شود که می‌توان آن را به صورت محصول نهایی شکل داد. ولی قبل از شکل‌دادن نهایی، لازم است اکسیدهای ترکیب‌کننده آن را ذوب کرد تا ترکیبی همگن به دست آید و گازهای حبس شده در آن خارج شود. خروج گازها اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا سودا و آهک موجود در شیشه‌ها (جدول ۸-۵-۱) از Na_2CO_3 و CaCO_3 به دست می‌آید که هردو ترکیب، CO_2 آزاد می‌کنند. واضح است که حباب هوایی که در شیشه باقی می‌ماند نوعی عیب است. فرایند نهایی شکل‌دادن می‌تواند پرس کردن (در

شیشه‌های ساختمانی)، یا نشکن کردن (در پنجره‌های بسیاری از اتومبیلها)، یا دمیدن (در مورد جابجایی لایمپ)، یا کشیدن (در رشته‌های شیشه‌ای [شکل ۸-۱-۱ (د)] و ... باشد.

شیشه‌های سرامیکی، بسیاری از ویژگیهای پلی‌مرهای گرم نرم را دارند. در حقیقت دمای شیشه‌ای T_g برای اولین بار در شیشه‌های سیلیسی شناخته شد (شکل ۴-۵-۳). ویسکوزیته η شیشه در برابر دما حساس است:

$$\log_{10} \eta = C' + \frac{B'}{T} \quad (1-8-8)$$

که در آن C' و B' برای شیشه ثابت* است.

کنترل ویسکوزیته در ساخت شیشه اهمیت دارد. در درجه اول شیشه باید در گستره ذوب ویسکوزیته پایین (کمتر از $30 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$ ، یا کمتر از 300 پواز) داشته باشد تا همان طور که در بالا گفته شد جابجا بتوانند خارج شوند و همگن شدن صورت گیرد. گستره کاد چندین رقم بامعنی را دربر می‌گیرد. عملیات سریع مسانند تولید جابجایی لایمپ به شیشه نسبتاً سیالی نیاز دارد ($10^{2.5} \text{ Pa} \cdot \text{sec}$ یا $10^{2.5}$ پواز)؛ عملیات کشش ورقهای سنگین شیشه به محصولی با ویسکوزیته بیشتر ($10^6 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$) نیاز دارد.

دو نقطه دیگر از نظر ویسکوزیته اهمیت دارند: (۱) نقطه تابکاری، دمایی با $\eta = 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{sec}$ (یا 10^{12} پواز)، و (۲) نقطه کرنش، دمایی با $\eta = 10^{13.5} \text{ Pa} \cdot \text{sec}$. در دمای نقطه تابکاری، آنها می‌توانند به اندازه کافی حرکت کنند به طوری که تنشهای گرمایی باقی مانده در مدت ۱۵ دقیقه از بین بروند. زمانی که با جدول زمانبندی تولید سازگار است. زیر نقطه کرنش، شیشه به حدی صلب است که بدون ایجاد تنشهای باقیمانده جدید قابل حمل است. نقطه کرنش زیر دمای انتقال شیشه‌ای است.

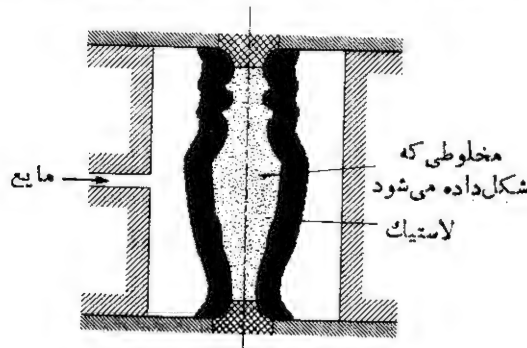
* جریان یافتن شیشه به حرکت آنها به دنبال تنشهای دیگر نیاز دارد و بنابراین به انرژی فعال‌سازی E بستگی دارد. شیشه‌ای که سیالیت زیاد، f (ویسکوزیته کم، زیرا $f = 1/\eta$) دارد، شیشه‌ای است که نفوذ در آن سریع صورت می‌گیرد. بنابراین همانطور که در روابط (۴-۶-۴) و (۴-۷-۴) داشتیم

$$\ln f = \ln f_0 - E/kT = -\ln \eta \quad (2-8-8)$$

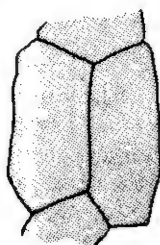
حال این معادله رابطه (۱-۸-۸) را به وجود می‌آورد. از آنجا که $\ln \eta = 2.3 \log \eta$ عبارات C' و B' به ترتیب برابر $-\ln f_0/2.3$ و $E/2.3k$ خواهند بود. سیالیت، نفوذپذیری (m^2/sec) بر واحد نیرو است. بنابراین ویسکوزیته ابعاد $\text{Pa} \cdot \text{s}$ دارد. واحدهای اولیه آن در دستگاه cgs «پواز» بود که در این حالت $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10$ پواز.

فرایندهای تفجوشی. بیشتر سرامیکهای غیر شیشه‌ای از ذرات بسیار ریز شده‌ای ساخته شده‌اند و پس از تفجوشی (پختن) به محصول یکپارچه تبدیل می‌شوند. هنرمندان، روش ماقبل تاریخ، که استفاده از رس بسیار نرم شده است، را به کار می‌برند. این رس هنگامی که خیس باشد هیدروپلاستیکی است. محصولاتی مانند آجر را می‌توان به صورت دلخواه شکل داد و خشک کرد، سپس بخت به طوری که ذرات تغییر یافته رس به هم جوش بخورند و پیوندی قوی و سخت به وجود آورند. همچنین می‌توان سرامیکها را با تعلیق، یا خمیری کردن به صورتی درآورد که بتوان آنها را در قالب گچی متخلخل ریخت. این عمل ریخته‌گری خمیری نامیده می‌شود. قالب، آب موجود در خمیر مجاور دیواره قالب را می‌گیرد. محصول سپس خشک و پخته می‌شود. این فرایند با انقباض قابل ملاحظه‌ای همراه است زیرا ضریب فشردگی ذرات جامد در قطعه ریختگی خمیری اولیه کم است.

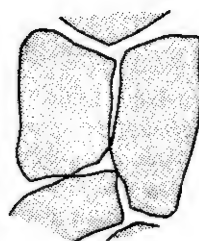
محصولات سرامیکی صنعتی معمولاً با فرایند پرسکاری شکل می‌گیرند. عایق شمع، که تا به حال چند بار به آن اشاره کرده‌ایم، با قالبگیری ایزوستاتیک ساخته می‌شود (شکل ۸-۸-۱). این فرایند از نظر ساخت مزیت مهمی دارد که عبارت است از اینکه اعمال فشار بالا به طور یکنواخت ممکن است. همچنین مقدار قابل اغماضی مایع نرم‌کننده لازم است که باید خشک شود. در نتیجه انقباض بعدی کم و به آسانی قابل کنترل است. البته برای پخته‌شدن یا تفجوشی دماهای بالا لازم است، زیرا این عایقها عمدتاً Al_2O_3 هستند. این اکسیدها پیوندهایی قوی دارند و بنابراین برای حرکت آنها نفوذپذیری آنها کم است. تفجوشی برای تجمع ذرات ریز به صورت توده مواد، گرما لازم دارد. تفجوشی بدون تشکیل مایع، به نفوذ در داخل جامد نیاز دارد و بنابراین در دماهای بسیار بالا (کمتر از نقطه ذوب) بسیار سریعتر انجام می‌پذیرد. بسیاری از فلزات به صورت گدرد در آمده و سرامیکهای دی الکتریک و مغناطیسی با تفجوشی در حالت جامد تولید می‌شوند.



شکل ۸-۸-۱ قالبگیری ایزوستاتیک (ساخت شمع اتومبیل) سیال هیدروستاتیک به صورت شعاعی به محصول فشار وارد می‌کند. در این روش پیشینه فشردگی امکانپذیر است.



(ب)



(الف)

شکل ۸-۸-۲ تفجوشی در حالت جامد. الف) ذرات قبل از تفجوشی دو سطح مجاور هم دارند؛ ب) دانه‌ها پس از تفجوشی یک مرزدانه دارند. نیروی محرکه تفجوشی کاهش سطح (و بنابراین کاهش انرژی سطحی است).

این مواد سرامیکی را نمی‌توان با ذوب کردن ساخت، و اغلب بوتۀ ذوب با قالبی برای این کار در دسترس نیست.

اصول حاکم بر تفجوشی در حالت جامد در شکل ۸-۸-۲ دیده می‌شود. طبق قسمت الف)، بین هر دو ذره، قبل از تفجوشی دو سطح وجود دارد. پس از تفجوشی، فقط یک مرزدانه وجود خواهد داشت. این دو سطح مرزهایی با انرژی بالاینده؛ مرزدانه انرژی بسیار کمتری دارد. بنابراین اگر انرژی برای حرکت تعداد کافی از اتمها کفایت کند، این واکنش به‌طور طبیعی صورت می‌گیرد.

مکانیسم واقعی تفجوشی در شکل ۸-۸-۳ به‌صورت عکسهایی که توسط میکروسکوپ الکترونی گرفته شده دیده می‌شود. نقاط تماس بین ذرات، با نفوذ اتمها، زیاد می‌شود. نفوذ خالص آنها موجب انقباض و به‌همراه آن کاهش تخلخل می‌شود. شکل ۸-۸-۴ پیشرفت واکنش تفجوشی را برای سدیم فلورید نشان می‌دهد.

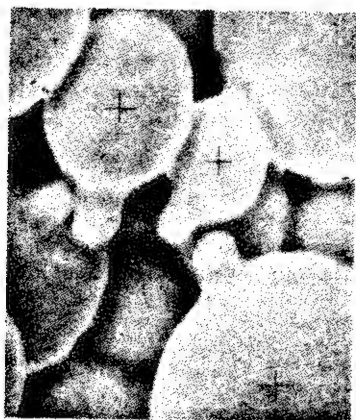
مثال ۸-۸-۱ گسترۀ کاربرد شیشه الکتریکی از ۸۷۰°C ($\eta = 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) یا ۱۰^7 پواز) تا ۱۳۰۰°C ($\eta = 10^{2.5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) یا $۱۰^{۲.۵}$ پواز) است. نقطۀ تابکاری آن ($\eta = 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) یا $۱۰^{۱۲}$ پواز) را تخمین بزنید.

حل: از رابطه (۸-۸-۱)

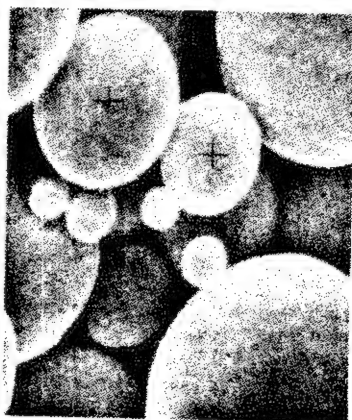
$$\epsilon = \frac{C' + B'}{870 + 273}$$

$$2.5 = \frac{C' + B'}{1300 + 273}$$

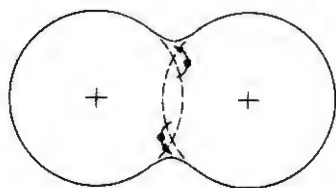
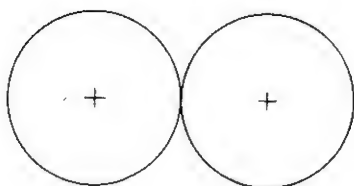
با حل این دو رابطه



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

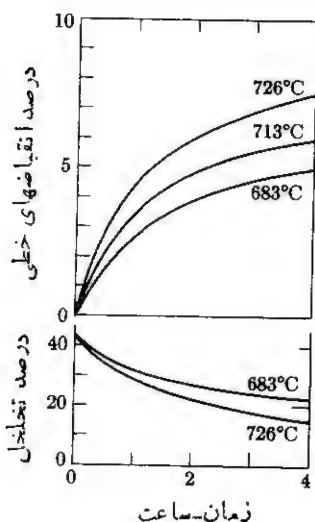
شکل ۸-۳-۸ تفجوشی (گردد نیکل). نقاط تماس اولیه در الف) در حین گرم کردن تا دمای 1100°C در ب) و ج) به صورت سطح در می آید؛ د) آنها از نقاط اتصال نفوذ می کنند تا سطح اتصال را وسعت بخشند. (تهیجایها در جهت مخالف نفوذ می کنند). ذرات گرد به هم نزدیکتر می شوند، و مقدار سطح ذرات کاهش می یابد.

$$B' = 14600 \text{ و } C' = -68$$

$$\eta = 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{ برای}$$

$$12 = -68 + \frac{14600}{T}$$

$$T = 775 \text{ K } (\approx 500^{\circ}\text{C})$$



شکل ۸-۸-۴ انقباض حاصل از تفجوشی (NaF).
NaF گرد شده (با عدد غریبال ۳۳۰-). در حین
تفجوشی هنگامی که منقبض می‌شود، تخلخل خود را از
دست می‌دهد.

توضیح. نقطه تابکاری تقریباً بادمای شیشه‌ای، T_g برابر است.

مثال ۸-۸-۲ مغناطیسی سرامیکی قبل از تفجوشی ۲۸٪ تخلخل دارد و پس از تفجوشی چگالی آن ۵۰۳ g/cm^3 است. چگالی حقیقی ۵۱۴ g/cm^3 (۵۱۴ Mg/m^3) است. الف) پس از پختن (تفجوشی) تخلخل چقدر است؟ ب) اگر بخواهیم اندازه نهایی آن ۱۶۳ باشد اندازه قالب چقدر باید باشد؟

حل:

$$\text{حجم واقعی ۱ گرم} = \frac{1}{514} = 0.1946 \text{ cm}^3$$

$$\text{حجم ۱ گرم پس از تفجوشی} = \frac{1}{503} = 0.1988 \text{ cm}^3 \quad (\text{الف})$$

$$\text{تخلخل نهایی} = \frac{0.1988 - 0.1946}{0.1988} = 2\%$$

$$\text{حجم حقیقی} = 0.72 V_o = 0.98 V_f$$

(ب)

$$V_o = \frac{L_o^3}{L_f^3} = \frac{0.98}{0.72}$$

$$L_o = L_f \sqrt[3]{\frac{0.98}{0.72}}$$

$$=(1673 \text{ mm})(1108) = 1871 \text{ mm}$$

توضیح. این مسئله از راههای مختلفی قابل حل است. ولی استفاده از مبنای یک گرم مناسب است زیرا مقایسه مستقیم تغییر حجم را ممکن می‌سازد.

توجه داشته باشید که اگر قالب برای ۱۰٪ انقباض در نظر گرفته شود (۱۸۷۱ mm) به (۱۶۷۳ mm)، روش فرایند بسایند طوری باشد که همیشه ۲۸٪ تخلخل در مرحله پرس کردن (تفجوشی مقدماتی) وجود داشته باشد. در غیر این صورت ویژگیهای ابعادی از دست خواهد رفت. متغیرهای فرایند باید دقیقاً کنترل شود. ▲

مثال ۸-۸-۳ چگالی حقیقی یک آهنربای سرامیکی 5041 Mg/m^3 (5041 g/cm^3) است. نمونه‌اندکی تفجوشی شده آن به صورت خشک ۳۷۹ گرم و اشباع شده آن با آب، ۳۸۴ گرم وزن دارد. نمونه اشباع شده وقتی در آب غوطه‌ور می‌شود ۳۰۸ گرم وزن دارد. الف) حجم حقیقی آن چقدر است؟ ب) حجم ظاهری آن (کل حجم) چقدر است؟ ج) تخلخل ظاهری (باز) آن چقدر است؟ د) کل تخلخل آن چقدر است؟

حل:

$$\text{الف)} \quad \text{حجم حقیقی} = \frac{379 \text{ g}}{5041 \text{ g/cm}^3} = 0.075 \text{ cm}^3$$

ب) با استفاده از قانون ارشمیدس

$$0.076 \text{ g} = 384 \text{ g} - 308 \text{ g} = \text{حجم آب جابه‌جا شده توسط نمونه}$$

$$\text{حجم کل} = \frac{0.076 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} = 0.076 \text{ cm}^3$$

این شامل ماده به علاوه تمام فضای منفذهاست.

$$\text{ج)} \quad \text{تخلخل باز} = \left[\frac{(384 - 379 \text{ g})}{(1 \text{ g/cm}^3)} \right] / 0.076 \text{ cm}^3$$

$$= 0.066 \quad (\text{بر اساس حجم ظاهری } v_o, \text{ یا } v_o)$$

$$\text{د)} \quad \text{کل تخلخل} = \frac{0.076 - 0.075 \text{ cm}^3}{0.076 \text{ cm}^3}$$

$$= 0.013 \quad (\text{بر اساس حجم ظاهری } v_o, \text{ یا } v_o)$$

توضیح. تخلخل بسته به برابر v_o ۱۳ است. چگالی توده‌ای برابر $5041 \text{ g/cm}^3 = 379 \text{ g} / 0.076 \text{ cm}^3$ است. چگالی ظاهری را می‌توان به این صورت

نیز تعریف کرد

$$\frac{\text{جرم}}{\text{حجم منفدهای باز} - \text{حجم توده}}$$

این چگالی برابر است با

$$\Delta \quad \frac{379 \text{ g}}{(0.0005 - 0.0001) \text{ cm}^3} = 534 \text{ g/cm}^3 \text{ (یا } 534 \text{ Mg/m}^3 \text{)}$$

مرور و بررسی مطالب

چون فازهای سرامیکی از عناصر فلزی و غیر فلزی تشکیل شده‌اند، توصیف کلی ساختار و خواص آنها به سادگی فلزات یا غیر فلزات مقدور نیست. مثلاً فلزات همواره رسانای الکتریسیته و گرمایند؛ بیشتر سرامیکها عایق‌اند ولی برخی از آنها خاصیت نیم رسانندگی دارند که کاربرد فنی دارد. ورقه‌های نازکی از پلی مرهای آلی همیشه نور را از خود عبور می‌دهند؛ حال آنکه سرامیکها می‌توانند مانند شیشه شفاف یا مانند اسپینل‌های مغناطیسی کدر باشند. سرامیکهای ساختمانی، تحت فشار، بسیار محکم و در کشش ضعیف‌اند. استحکام کششی الیاف شیشه‌ای می‌تواند از فولاد هم بیشتر باشد بنا بر این از آن به عنوان تقویت کننده استفاده می‌شود. شیشه نیز ماده‌ای ترد و شکننده به شمار می‌آید که هنگام حمل و نقل به دقت زیادی نیاز دارد.

مثالهای فوق تنها چند مورد از شواهدی است که نشان می‌دهند مواد سرامیکی می‌توانند خواص بسیار متنوعی داشته باشند. بسیاری از آنها برای تکنولوژی امروز ضروری‌اند، ولی از سایر مواد پیچیده‌ترند و بنا بر این به آشنایی فنی و مطالعه بیشتری نیاز دارند.

خلاصه: ساختار سرامیکها

ترکیبات سرامیکی ساده تر را می‌توان به صورت شبکه‌ای از آنیونها در نظر گرفت که کاتیونها در محلهای معینی در بین آنها قرار گرفته‌اند. به عنوان مدل اصلی ساختارهای نوع CsCl و NaCl و ZnS را بررسی کردیم که در آنها کاتیونها به ترتیب در محلهای بین نشینی f-۸، f-۶ و f-۴ قرار می‌گیرند. این نوع ساختارها در جدول ۸-۲-۱ خلاصه شده‌اند. با مشاهده چگونگی ترتیب کاتیونها در محلهای بین نشینی f-۴ و f-۶ ساختارهای پیچیده‌تری مانند ساختار متعلق به اسپینل‌های مغناطیسی را می‌توان تحلیل کرد.

شیشه‌ها بیشتر از سایر ترکیبات سرامیکی پیوند کووالانسی دارند. اساس ساختار آنها واحدهای چهاروجهی SiO_۴ است که در آنها سیلیسیم با چهار اکسیژن کوئوردینانس شده است. در سیلیس خالص که در آن فقط سیلیسیم و اکسیژن موجود است، هراتم اکسیژن به عنوان پلی بین دو واحد چهاروجهی عمل می‌کند و شبکه‌ای صلب تشکیل می‌دهد.

افزایش اکسیدهای دیگر موجب قرار گرفتن اکسیژن در خارج از این پلها می شود و بنابراین شبکه را اصلاح می کند و شیشه را گرماتر می کند.

خلاصه: خواص و رفتار سرامیکها

عایقهای سرامیکی طوری طرح می شوند که از نظر الکتریکی بی اثر باشند. با این حال یونهای موجود می توانند به میدان الکتریکی پاسخ دهند، و موجب قطبش در ماده دی الکتریک شوند. ضریب دی الکتریک حاصل در خازنها کاربرد مفیدی دارد؛ ولی اگر تغییر مکان یونها نسبت به میدان الکتریکی تأخیر داشته باشد، موجب اتلاف توان خواهد شد. قطبش دائمی، خاصیت پیزوالکتریکی ایجاد می کند که به ایجاد ترانسدیسورهای الکترومکانیکی منجر می شود. سرامیکهای نیم رسانا، خاصیت خود را مدیون اتمهایی اند که حالت های چند ظرفیتی دارند. لازمه وجود سرامیکهای مغناطیسی، یونهای اند که مدارهای زیر ظرفیتی پر نشده دارند. در این حالت هراتم مانند آهنربای کوچکی عمل می کند. در مجموع حوزه های مغناطیسی به وجود می آیند که به میدان مغناطیسی پاسخ می دهند.

ترکیبات سرامیکی، یا بین فلزی، در برابر تغییر شکل برشی به شدت مقاومت می کنند. در نتیجه به شکاف (یا ترک) حساس اند. به همین علت استحکام کششی آنها کم است. ولی مقاومت آنها در برابر برش موجب می شود که استحکام فشاری زیادی داشته باشند. پس مواد سرامیکی برای استفاده در سازه ها یا طراحی محصولات که تحت فشار قرار می گیرند برگزیده می شوند. همچنین، مواد سرامیکی در مهندسی طوری ساخته می شوند که در سطح تحت فشار باشند. در صورتی که نیرو اعمال شده باشد و یکوزیته شیشه از همان قوانین نفوذ پیروی می کند.

سوالات تشریحی

۱. فهرستی از شش ماده سرامیکی بنویسید که کاربرد فنی داشته باشند و در این کتاب در باره آنها بحث نشده باشد.
۲. تفاوت بین ساختارهای نوع CsCl، نوع NaCl، و نوع ZnS را با توجه به عدد کوئوردیناسیون مربوط به کمینه نسبت اندازه یون، و تعداد یونها در هر سلول واحد، بنویسید.
۳. دو ماده KCl و MnSe ساختار مشابهی (نوع NaCl) دارند. اگرچه K^+ سبکتر از Mn^{2+} (۳۹ amu در مقابل ۵۵ amu) و Cl^- سبکتر از Se^{2+} است، ثابت شبکه KCl ($a > 0.۳۶$ nm) بیشتر از MnSe ($a < 0.۳۶$ nm) است. علت آن را شرح دهید.
۴. آرایش اتمی صفحه (۱۲۰) در ZnS را رسم کنید. (برای CaF_2 ، به شکل ۸-۳-۲ رجوع کنید.) برای صفحه (۱۱۰) این عمل را تکرار کنید.
۵. مطابق با شکل ۸-۴-۱، $BaTiO_3$ مکعبی در مرکز هروجه اتم اکسیژنی دارد. ولی

- ساختر آن مکبی با وجوه مرکزدار نیست. چرا؟
۶. شکل ۱-۳-۴ با یونهای Mg^{2+} ، Fe^{2+} و O^{2-} ، و شکل ۱-۴-۸ با یونهای Ba^{2+} ، Ti^{3+} و O^{2-} هردو، سه نوع یون دارند. یکی از آنها را محلول جامد و دیگری را ترکیب $A_m B_n X_p$ می نامیم. علت این تفاوت چیست؟
۷. MnO و MnS هر دو ساختار نوع $NaCl$ دارند. مقدار محلولی جامد ($\sim 1a/o$) دیده می شود. مکانیسم آن را بنویسید. چرا مقدار محلول جامد محدود است؟
۸. □ شکلی از آرایه منشورشش بر هسته های اتمی رسم کنید. اکنون لایه دوم را که می تواند در بالای لایه اول به صورت فشرده قرار گیرد به صورت خط چین رسم کنید. مکانهای شش تایی بین دو لایه را نشان دهید؛ مکانهای چهار تایی دو لایه را نیز نشان دهید.
۹. □ $MnTe$ دارای دو چند شکلی است. یکی ساختار نوع $NaCl$ و دیگری ساختار نوع $NiAs$ دارد. در هر یک از موارد Mn^{2+} بین شش یون Te^{2-} می نشیند. ولی بسیار نرم تر و اعطاف پذیر تر از دومی است. علت را شرح دهید.
۱۰. با استفاده از نقاط الکترونی [به شکل ۲-۲-۳ (الف) رجوع کنید]. پیوند کووالانسی را در یون SiO_4^{4-} نشان دهید. پیوندهای یونی را نیز نشان دهید.
۱۱. ساختار کریستوبالیت (شکل ۲-۵-۸) را با ساختار ZnS (شکل ۲-۸-۴) و با سیلیسیم که ساختار الماس (شکل ۲-۲-۴) را دارد، مقایسه کنید.
۱۲. کریستوبالیت هنگامی که ذوب می شود و به سیلیس مذاب تبدیل می شود، تقریباً انبساطی ندارد. علت آن را شرح دهید.
۱۳. فرق بین اکسیژن پلساز و اکسیژن غیر پلساز و اثر آنها را روی تغییر شکل شیشه در بالای دمای شیشه ای شرح دهید.
۱۴. B_2O_3 به خوبی شیشه تشکیل می دهد. ساختار آن و رفتار ویسکوز آن را با سیلیس ذوب شده (SiO_2) مقایسه کنید.
۱۵. اکسید باید چه ویژگی خاصی داشته باشد تا در ساختار شیشه به عنوان اصلاح کننده شبکه عمل کند؟ شش اکسید را نام ببرید که این نقش را داشته باشند.
۱۶. (الف) دو راه تاثیر ترك روی عایق الکتریکی را شرح دهید. (ب) چرا عایقها قبل از استفاده در خطوط و تار بالالعب داده می شوند؟
۱۷. تفاوت بین ثابت دی الکتریک و استحکام دی الکتریک را بنویسید.
۱۸. نیم رساناهای سرامیکی معمولاً حاوی فلزاتی اند که شیمیدانها آنها را فلزات واسطه می نامند (گروه B در شکل ۱-۱-۲). چرا اکسیدهای این فلزات نیم رسانا هستند؟
۱۹. برای کسی که این درس را نگرفته است شرح دهید که چرا اذاتریجهای سرامیکی در گرما فون سیگنالی ایجاد می کنند که قابل تقویت کردن است؟
۲۰. مفهومی برای شمع پیزوالکتریک بنویسید.
۲۱. □ با استفاده از پیوست (ب) تعداد مگنتونهای بوهر (الکترونهای جفت نشده d در

- هر اتم) متعلق به عناصری با عدد اتمی بین ۲۰ و ۳۰ را ذکر کنید.
- ۲۲ □ معمولاً در MnO خاصیت مغناطیسی مشاهده نمی‌شود؛ با وجود آنکه هسراکاتیون متعلق به پنج مگنتون بوهر است، و آزمایش نشان می‌دهد که MnO به تغییرات میدان مغناطیسی پاسخ می‌دهد. دلیلی برای مغناطیسی نبودن آن ذکر کنید. (MnO ساختار نوع $NaCl$ دارد).
۲۳. چرا نتایج آزمایش کشش در سرامیکها نسبت به فلزات پراکندگی بیشتری نشان می‌دهد؟
۲۴. یونهای Na^+ در شیشه را می‌توان به صورتی از سطح خارج کرد و به جای آن یونهای K^+ قرارداد (این کار تعویض یونی نامیده می‌شود). اگر این کار زیرمای انتقال شیشه‌ای صورت گیرد، استحکام شیشه تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این فرایند گاهی باز پخت شیمیایی نامیده می‌شود، زیرا اثرات آن روی خواص مشابه با باز پخت در شکل ۸-۷-۵ است. علت افزایش استحکام چیست؟
۲۵. سوار کردن ابزار برش سرامیک (Al_2O_3) روی دستگاه تراش باید با ابزار ساخته شده از فولاد «تندبر» متفاوت باشد چرا؟
۲۶. لعاب بشقابهای غذاخوری طوری انتخاب می‌شود که ضریب انبساط گرمایی لعاب کمی کمتر از چینی زیر آن باشد. شرح دهید که چرا این کار محصول را پراستحکامتر می‌کند.

مسائل

- ۸-۲-۱ چگالی $CsCl$ را از داده‌های موجود در پیوست محاسبه کنید. (یادآوری می‌شود که $CN=8$ است).
- جواب: 3.94 Mg/m^3
- ۸-۲-۲ $CsCl$ ساختار مکعبی ساده‌ای از یونهای Cl^- دارد که یونهای Cs^+ در محلهای ۸ گانه آن قرار گرفته‌اند. الف) شعاعهای آنها به ترتیب 0.187 nm و 0.172 nm است، برای $CN=8$ ، ضریب فشردگی چقدر است؟ ب) اگر $r/R=0.73$ باشد، این ضریب چقدر خواهد بود؟
- ۸-۲-۳ ترکیب بین‌فلزی $AlNi$ ساختار نوع $CsCl$ دارد که در آن $a=0.2881 \text{ nm}$ است. چگالی آن را حساب کنید.
- جواب: 6.0 Mg/m^3
- ۸-۲-۴ داده‌های اشعه X نشان می‌دهد که ابعاد سلول واحد مکعبی MgO برابر 0.42 nm است. چگالی آن 3.61 Mg/m^3 است. چه تعداد Mg^{2+} و یون O^{2-} در هر سلول واحد وجود دارد؟

۵-۲-۸ در ساختار پریکلاس (MgO) یونهای O^{2-} به صورت fcc قرار گرفته اند و یونهای Mg^{2+} در تمام مکانهای شش گانه جای گرفته اند. الف) شعاعهای آنها به ترتیب $nm\ 0.140$ و $nm\ 0.066$ است، ضریب فشردگی آن چقدر است؟ (ب) اگر $r/R = 0.41$ باشد این ضریب چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) 0.73 ب) 0.80

۶-۲-۸ اکسید نیکل مکعبی است و چگالی آن برابر $Mg/m^3\ 6.87$ ($g/cm^3\ 6.87$) است. ثابت شبکه آن $nm\ 0.357$ است. در هر سلول واحد آن چه تعداد اتم وجود دارد؟ (یون نیکل Ni^{2+} است.)

۷-۲-۸ چگالی لیتیم فلورید $Mg/m^3\ 2.6$ و ساختار آن از نوع NaCl است. از این داده ها برای محاسبه اندازه سلول واحد، a ، استفاده کنید و جواب را با مقدار به دست آمده از شعاع یونی مقایسه کنید.

جواب: $nm\ 0.405$ در مقابل $nm\ 0.402$

۸-۲-۸ چگالی ZnS (شکل ۴-۲-۸) برابر $Mg/m^3\ 4.1$ است. بر اساس این مقدار، فاصله بین مراکز دو یون چقدر است؟

۹-۲-۸ چگالی دوچند شکلی MnS در مثال ۴-۲-۸ را تخمین بزنید.

جواب: الف) $Mg/m^3\ 3.9$ ب) $Mg/m^3\ 3.4$

۱۰-۲-۸ در کتابهای شیمی برای NH_4Cl چگالی $g/cm^3\ 1.5$ (یا $Mg/m^3\ 1.5$) داده شده است. اشعه X نشان می دهد که NH_4Cl دوچند شکلی دارد: یکی ساختار نوع NaCl دارد که در آن $a = nm\ 0.357$ است، و دیگری ساختار نوع CsCl دارد که در آن $a = nm\ 0.387$ است. چگالی فوق متعلق به کدام چند شکلی است؟ (یون NH_4^+ به عنوان یک واحد، شبکه بلوری را اشغال می کند.)

۱۱-۲-۸ به فرض آنکه در فشار بالا NaCl بتواند به ساختار نوع CsCl تبدیل شود درصد تغییر حجم چقدر خواهد بود؟ (به پا نوشت پیوست (ب) در مورد شعاع مربوط به $CN = 6$ و $CN = 8$ توجه کنید.)

جواب: 16%

۱۲-۳-۸ در صورتی که $CN = 4$ باشد $R_O^{2-} = nm\ 0.127$ (جدول ۲-۵-۱). در صورتی که $CN = 8$ باشد $r_{Zr^{4+}} \approx nm\ 0.085$. اندازه سلول واحد ZrO_2 را که ساختار نوع CaF_2 دارد تخمین بزنید.

جواب: $nm\ 0.49$ (در مقابل $nm\ 0.507$ که از آزمایش به دست آمده است.)

۸-۳-۲ با استفاده از شعاع به دست آمده از مثال ۸-۳-۲، آیا اندازه برآورده شده سلول واحد از مقدار تجربی $a = 0.547 \text{ nm}$ بزرگتر است یا کوچکتر؟ (برای تشریح آن به توضیح مثال ۸-۳-۱ توجه کنید.)

۸-۳-۳ اندازه سلول واحد UO_2 ، یعنی a ، برابر 0.547 nm است. الف) براساس این این اطلاعات و شکل ۸-۳-۱، چگالی خطی یون U^{4+} در جهات $\langle 110 \rangle$ چقدر است؟ برای یون O^{2-} (چطور؟ ب) چگالی خطی یون U^{4+} در جهات $\langle 100 \rangle$ چقدر است؟ برای یونهای O^{2-} (چطور؟ ج) چگالی خطی یون U^{4+} در جهات $\langle 111 \rangle$ چقدر است؟ برای یونهای O^{2-} (چطور؟)

جواب: الف) $2.6 \times 10^6 / \text{mm}$ ، $2.6 \times 10^6 / \text{mm}$ ؛ ب) $1.8 \times 10^6 / \text{mm}$ ، $3.7 \times 10^6 / \text{mm}$ ؛ ج) $1.1 \times 10^6 / \text{mm}$ ، $1.1 \times 10^6 / \text{mm}$

۸-۳-۴ آیا MgF_2 می تواند همان ساختار CaF_2 را داشته باشد؟ شرح دهید.

۸-۴-۱ BaTiO_3 از تکلیس BaCO_3 و تبدیل آن به BaO و سپس مخلوط کردن آن با TiO_2 به دست می آید. الف) برای 100 گرم محصول چه مقدار BaO و TiO_2 لازم است؟ ب) به ازای هر گرم محصول چه مقدار BaCO_3 لازم است. ($\text{Ba} = 137.34 \text{ amu}$)

جواب: الف) 65.7 g BaO و 24.3 g TiO_2 ؛ ب) 84.6 g BaCO_3

۸-۴-۲ کلسیم تیتانیت (CaTiO_3) همان ساختار BaTiO_3 را دارد. مکعبی است و چگالی آن 4 Mg/m^3 است. ثابت شبکه آن را حساب کنید.

۸-۴-۳ چگالی PbTiO_3 مکعبی 7.5 Mg/m^3 است. اندازه سلول واحد شبکه چقدر است؟

جواب: 406 nm (در مقابل 397 nm به دست آمده از آزمایش.)

۸-۴-۴ مقدار اکسیژن موجود در الف) Fe_3O_4 ؛ و ب) NiFe_2O_4 را حساب کنید.

۸-۴-۵ محلول جامدی حاوی 30 درصد مولی MgO و 70 درصد مولی LiF الف) درصد وزنی Li^+ ، Mg^{2+} ، F^- ، O^{2-} چقدر است؟ ب) چگالی چقدر است؟

جواب: الف) 16 w/o Li^+ ، 24 w/o Mg^{2+} ، 44 w/o F^- ، 16 w/o O^{2-} ؛ ب) $30 \text{ g/cm}^3 (= 30 \text{ Mg/m}^3)$

۸-۴-۶ چه نوعی از تهیجای، آنیون یا کاتیون باید با MgF_2 همراه باشد تا در LiF حل شود؟ کدام یک از آنها باید با LiF همراه باشند تا در MgF_2 حل شود؟

۸-۴-۷ اگر یک یون Ca^{2+} به ازای هر شش یون Zr^{4+} موجود، به محلول جامد ZrO_2

اضافه شود امکان به وجود آمدن شکل مکعبی آن وجود دارد. در این حالت کاتیونها ساختار fcc تشکیل می دهند، و یونهای O^{2-} در مکانهای چهارگانه جای می گیرند. الف) چه تعداد یون O^{2-} به ازای هر ۱۰۰ کاتیون وجود دارد؟ ب) چه کسری از مکانهای چهارتایی اشغال شده اند؟

جواب: الف) یون O^{2-} ۱۸۵۷ (ب) ۹۲۹٪

۸-۴-۸ الف) عدد کوئوردیناسیون Ba^{2+} در $BaTiO_3$ چقدر است؟ ب) عدد کوئوردیناسیون Ti^{4+} چقدر است؟ ج) چرا یون O^{2-} نمی تواند کروی فرض شود؟

۸-۴-۹ اندازه سلول واحد فرو اسپینل در مثال ۸-۴-۱ برابر 0.84 nm است. الف) چگالی آن را حساب کنید؛ ب) کمترین فاصله بین یونهای O^{2-} (مرکز به مرکز) چقدر است؟

جواب: الف) 5.3 Mg/m^3 (ب) 0.297 nm

۸-۴-۱۰ ثابت شبکه a در $BaTiO_3$ مکعبی برابر 0.40 nm است. با در نظر گرفتن اینکه $r_{Ti^{4+}} = 0.068 \text{ nm}$ (پیوست ب)، و $r_{Ba^{2+}} = 0.148 \text{ nm}$ است، اگر $CN = 12$ باشد، الف) شعاع R یون O^{2-} در جهات $\langle 100 \rangle$ چقدر است؟ ب) در جهات $\langle 110 \rangle$ چطور؟

۸-۴-۱۱ یک دهم درصد وزنی Fe_2O_3 همراه با NiO در محلول جامد موجود است. در این حالت $(\square + 2Fe^{3+})$ جانشین $3Ni^{2+}$ شده است تا از جهت بار موازنه شود. چه تعداد تهیجای کاتیون در هر m^3 وجود دارد؟

۸-۵-۱ با مراجعه به شکل ۸-۵-۲ در جایی که $a = 0.693 \text{ nm}$ است، چه تعداد اتم سیلیسیم و اکسیژن در هر m^3 موجود است؟

جواب: $4.80 \times 10^{28} \text{ O/m}^3$ ، $2.40 \times 10^{28} \text{ Si/m}^3$

۸-۵-۲ هنگامی که کوارتز (مثال ۸-۵-۱) به چندشکلی SiO_2 ، مطابق با شکل ۸-۵-۲، تبدیل می شود، انبساط حجمی آن چقدر است؟ (در صورت لزوم از داده های مسئله ۸-۵-۱ استفاده کنید.)

۸-۵-۳ ضریب فشردگی SiO_2 در کریستو بسالیت چقدر است (شکل ۸-۵-۲)؟ (در صورت لزوم از داده های مسئله ۸-۵-۱ و مثال ۸-۵-۳ استفاده کنید.)

جواب: ۰.۲۹

۸-۵-۴ با استفاده از اطلاعات موجود در مثال ۸-۵-۳، اندازه سلول واحد SiO_2 ، a ، در شکل ۸-۵-۲ را معین کنید.

۵-۵-۸ چگالی کوئسیت، چندشکلی SiO_2 در فشار بالا، برابر 2.9 Mg/m^3 است. ضریب فشردگی آن چقدر است؟ ($R_0 = 0.112 \text{ nm}$; $r_{\text{Si}} = 0.038 \text{ nm}$)

جواب: ۰.۳۶

۶-۵-۸ شیشه‌ای فقط حاوی Na_2O و SiO_2 است و ساختاری دارد که در آن ۷۲٪ از اتمهای اکسیژن به عنوان پلی بین سیلیسیمهای مجاور عمل می‌کنند به‌ازای هر ۱۰۰ اتم اکسیژن چه تعداد اتم سدیم و سیلیسیم وجود دارد؟

۷-۵-۸ شیشه‌ای حاوی 75 w/o SiO_2 و 25 w/o CaO است. چه کسری از اکسیژنهای آن به عنوان پلی بین دو اتم سیلیسیم عمل می‌کنند؟

جواب: ۷۰ a/o

۸-۵-۸ شیشه پنجره‌ای از نوع شیشه سودا-آهکی با نسبت وزنی $14 \text{ Na}_2\text{O}-14 \text{ CaO}-72 \text{ SiO}_2$ است. چه کسری از اتمهای اکسیژن در تشکیل پلی شرکت نکرده‌اند؟

۸-۶-۸ در مثال ۸-۶-۲ ذکر شده است که $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{2+}$ معمولاً کمتر از 10^{-4} است. اگر اکسید نیکل خالص این نسبت را داشته باشد، در هر m^3 چه تعداد حامل بار موجود است؟ (یادآوری می‌شود که 3 Ni^{2+} جانشین $(2 \text{ Ni}^{3+} + \square)$ می‌شود).

جواب: $5.8 \times 10^{24} / \text{m}^3$

۸-۶-۲ مقداری TiO_2 ناستوکیومتری است. اولی نسبت $\text{Ti}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ در آن برابر ۱۰۰۰ است. الف) این اکسید از نوع n است یا از نوع p ؟ ب) چگالی TiO_2 برابر 4.26 Mg/m^3 است. در هر m^3 چه تعداد حامل وجود دارد؟

۸-۶-۳ پتاسیم نیوبات (KNbO_3) همان ساختار BaTiO_3 را دارد، ولی به جای Ba^{2+} ، K^{+} و به جای Ti^{4+} ، Nb^{5+} قرار گرفته است. فرض کنید که ابعاد سلول واحد KNbO_3 تقریباً مطابق شکل ۸-۶-۲ برای BaTiO_3 باشد. الف) فاصله بین مراکز بارهای مثبت و منفی در سلول واحد چقدر است؟ ب) گشتاور دو قطبی سلول واحد، $\mu = Qd$ ، چقدر است؟ ج) چه قطبشی امکان پذیر است؟

جواب: الف) 0.117 nm (ب) $3.0 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ ج) 1.75 C/m^2

۸-۶-۴ با مراجعه به مثال ۸-۶-۳، مکعب ده میلی متری BaTiO_3 ، ۱٪ فشرده شده است. دو انتهایی که تحت فشار قرار می‌گیرند به‌طور الکتریکی متصل شده‌اند. چه تعداد الکترون از انتهای منفی به انتهای مثبت منتقل می‌شوند.

۸-۶-۵ مدول یانگ بلور پیزوالکتریکی برابر 80000 MPa است. برای کاهش قطبش آن از $800 \text{ C} \cdot \text{m/m}^3$ به 788 چه تنش باید اعمال شود؟

جواب: ۱۲۰۰ MPa

۸-۶-۶ با مراجعه به مثال ۸-۶-۳، فاصله بین مراکز بارهای مثبت و منفی هر سلول واحد چقدر است؟

□ ۸-۶-۷ ماده سرامیکی مغناطیسی نیکل فريت در هر سلول واحد هشت $[\text{NiFe}_2\text{O}_4]$ دارد که مکعبی است و در آن $a = 0.834 \text{ nm}$ است. فرض کنید تمام سلولهای واحد جهنگیری مغناطیسی مشابهی داشته باشند؛ اشباع مغناطیسی آن چقدر است؟ (هر یون Ni^{2+} دو مگنتون بوهر دارد.)

□ ۸-۶-۸ مگنتز فريت $[\text{MnFe}_2\text{O}_4]$ دارای همان ساختار مگنتیت $[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4]$ است و ثابت شبکه تقریباً یکسانی (0.82 nm) دارد. اشباع مغناطیسی آن چقدر است؟ (هر یون Mn^{2+} پنج مگنتون بوهر دارد.)

۸-۶-۹ با مراجعه به مسئله ۸-۶-۷، فرض کنید زمانی که قسمتی از میدان خارجی از میان برداشته شود، قطبیت N-S در ۴۰٪ از سلولهای واحد، 180° بچرخد. چه مقدار از مغناطش باقی می ماند؟

جواب: ۵۰۰۰۰ A/m

□ ۸-۶-۱۰ با استفاده از بخش ۱-۲، تعداد مگنتونهای بوهر، β ، متعلق به یونهای دوظرفیتی فلزات واسطه: Cu^{2+} ، Ni^{2+} ، Co^{2+} ، Fe^{2+} ، Mn^{2+} ، Cr^{2+} ، Ti^{2+} را تعیین کنید. تعداد مگنتونهای متعلق به کاتیونهای سه ظرفیتی Co^{3+} ، Fe^{3+} ، Mn^{3+} ، Cr^{3+} ، Ti^{3+} چقدر است؟

□ ۸-۶-۱۱ با مراجعه به مثال ۸-۶-۱، در این فروراسپینل مخصوص، یونهای Zn^{2+} ترجیحاً مکانهای ۴ گانه را انتخاب می کنند و Fe^{3+} مربوط به آن را به مکانهای شش گانه می رانند. الف) این عمل در هر سلول واحد $(\text{Zn}_2\text{Ni}_8)\text{Fe}_{16}\text{O}_{48}$ چه تعداد مگنتون بوهر به وجود می آورد؟ ب) اگر تمام یونهای دوظرفیتی در مکانهای شش گانه قرار گیرند، چه تعدادی مگنتون در $[\text{NiFe}_2\text{O}_4]$ وجود خواهد داشت؟

جواب: الف) ۴۰ ب) ۱۶

۸-۷-۱ تحت شرایط معینی، در ساختار نوع NaCl سیستمهای لغزش $\{100\}$ و $\{011\}$ می توانند علاوه بر آنچه که در مثال ۸-۷-۱ ذکر شده است عمل کنند. الف) در این مجموعه چه تعداد سیستم لغزش وجود دارد. آنها را ذکر کنید؛ □ ب) بردار لغزش در PbS که ساختار نوع NaCl دارد، در سیستم لغزش فوق چقدر است؟

جواب: الف) ۶ ب) 0.43 nm

۸-۷-۲ در صفحه ای شیشه ای به ضخامت 45 mm سوراخ گردی (به قطر 12.5 mm)

ایجاد شده است. فرض کنید که سطح سوراخ بدون ترک باشد و تنش 10 MPa در جهتی مطابق با شکل ۸-۷-۲ اعمال شود. تمرکز تنش در سطح سوراخ چقدر است؟

۸-۷-۳ ترکهای مویی به عمق $1 \mu\text{m}$ که نوکهای آنها ابعاد اتمی دارند در سطح سوراخ مسئله ۸-۷-۲ تشکیل شده اند. تنشهای موجود در نوکهای آنها را برآورد کنید.

جواب: 3400 MPa

۸-۷-۴ صفحه شیشه ای بزرگی، سوراخی به قطر 10 میلی متر دارد. الف) ضریب تمرکز تنش حاصل از تنشی کششی که به موازات صفحه اعمال شده است، در مجاورت سوراخ چقدر است؟ ب) وقتی سوراخ زده شد، ترکهایی به عمق $10 \mu\text{m}$ در کنار سوراخ به وجود آمد. اگر مانند مثال ۸-۷-۲ فرض شود که این نوع ترک ابعاد یون اکسیژن را دارد، کل تمرکز تنش به وجود آمده چقدر است؟

۸-۷-۵ میل گردی يك میلی متری با ترکیب شیشه صفحه ای (پیوست ج) با 1 mm در شیشه بوروسیلیکات پوشش داده شده است، به طوری که میل اکنون 12 mm قطر دارد. فرض کنید در 200°C تنش اولیه ای وجود ندارد، اگر میل مرکب تا 20°C سرد شود، تنش طولی حاصل چقدر است؟

جواب: $55 \text{ MPa} = -$ بوروسیلیکات، $25 \text{ MPa} = +$ شیشه صفحه ای

۸-۷-۶ مسئله قبل را با عوض کردن جای دوشیشه تکرار کنید. الف) کدامیک تنش بیشتری دارند، شیشه صفحه ای یا بوروسیلیکات؟ ب) در مورد استحکام این میل شیشه ای مرکب توضیح دهید.

۸-۷-۷ استحکام مواد بی شکل به صورت تئوری بین $G/6$ و $G/4$ محاسبه شده است که در آن G مدول برشی است. استحکام شیشه را براساس خواص کشسان آن و با استفاده از $v=0.25$ به صورت تئوری محاسبه کنید.

جواب: 7000 MPa - 5000 MPa

□ ۸-۸-۱ فرض کنید که سرعت جریان شیشه با ویسکوزیته η نسبت عکس دارد. جریان یافتن شیشه الکتریکی مذاب (مثال ۸-۸-۱) از کوره 920°C چقدر سریعتر از کوره 900°C است؟

جواب: $\dot{F}_{920} = 1.6 \dot{F}_{900}$ ؛ $\eta_{920}/\eta_{900} = 0.618$

□ ۸-۸-۲ ویسکوزیته شیشه پنجره از $10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ در 680°C به $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ در 1035°C افت می کند. ویسکوزیته آن در 900°C چقدر است؟

۸-۸-۳ عایقی سرامیکی پس از تفجوشی، $v/0$ تخلخل دارد و باید 137 mm طول

داشته باشد. در حین ساخت، گرد آن می تواند تا $24\frac{7}{10}$ تخلخل، پرس شود. اندازه قالب چقدر باید باشد؟

جواب: ۱۵۰ mm

۸-۸-۴ بعد نهایی فریتی مغناطیسی که قطعه ای از نوسان نما است باید ۱۵۰۸ mm باشد. انقباض حجمی آن در حین تفجوشی ۳۳٪ است (بر اساس تفجوشی نشده آن). ابعاد اولیه گرد فشرده شده آن چقدر باید باشد؟

۸-۸-۵ قطعه ای از فلز گرد شده پس از فشرده شدن و قبل از تفجوشی ۲۳٪ تخلخل دارد. اگر تخلخل پس از تفجوشی ۲٪ در نظر گرفته شود انقباض خطی مجاز چقدر است؟

جواب: ۸٪ (بر اساس تفجوشی شده)

۸-۸-۶ آجری پس از خشک شدن ۳۳ کیلوگرم وزن دارد. وقتی با آب اشباع می شود ۳۴۵ کیلوگرم و وقتی در آب غوطه ور می شود ۱۹ کیلوگرم وزن پیدا می کند. الف) تخلخل ظاهری آن چقدر است؟ ب) چگالی توده ای آن چقدر است؟ ج) چگالی ظاهری آن چقدر است؟

۸-۸-۷ قطعه ای از کاشی سرامیکی به ابعاد $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ، ۲۵۵ گ آب جذب می کند. تخلخل ظاهری کاشی چقدر است؟

جواب: $25\frac{7}{10}$

۸-۸-۸ آجر عایقی وقتی خشک است ۱۷۷ Kg، وقتی با آب اشباع می شود ۲۲۵ Kg و وقتی در آب غوطه ور می شود ۱۰۵ kg وزن دارد. الف) تخلخل ظاهری آن چقدر است؟ ب) چگالی توده ای آن چقدر است؟ ج) چگالی ظاهری آن چقدر است؟

۸-۸-۹ محصولی از چینی الکتریکی وقتی فروخته می شود فقط $1\frac{7}{10}$ تخلخل دارد. پس از پرس و خشک کردن کلا $27\frac{7}{10}$ تخلخل داشته است. انقباض خطی در حین تفجوشی چقدر است؟

جواب: $97\frac{1}{10}$

۸-۸-۱۰ با مراجعه به شکل ۸-۸-۳، الف) در حین تفجوشی این گرد از قسمت (الف) تا قسمت (ج) چه مقدار انقباض خطی صورت می گیرد؟ ب) انقباض حجمی چقدر است؟

مواد چند فاز: نمودارهای فازی

چشم انداز فصل

پس از مطالعه مواد تک فاز اکنون موادی را که شامل دو یا چند فازند بررسی می کنیم. در فصل ۹ توجه ما بیشتر به نمودارهای تعادلی معطوف خواهد شد زیرا اساس مطالعه فصلهای ۱۰ و ۱۱ هستند.

می آموزیم که چگونه از نمودارهای فازی در موارد زیر استفاده کنیم:

- (۱) پیش بینی آنکه در آلیاژی با ترکیب معین در هر دما چه فازهایی در حال تعادل اند،
- (۲) تعیین ترکیب شیمیایی هر فاز، و (۳) محاسبه مقادیر هر فاز موجود. برای مهندسان و دانشورزانی که مواد را برای کاربرد خاصی طراحی می کنند نمودارهای تعادلی از مهمترین ابزار موجود به شمار می آیند و برای پیش بینی پایداری مواد به هنگام طراحی محصولات برای کار در محیطهای مختلف نیز مفیدند.

در تمام این فصل فرض بر این خواهد بود که تعادل به دست آمده است و واکنش بین فازهای موجود ادامه نمی یابد.

هدف از مطالعه

۰۱. تصویر نمودار فازی به صورت منحنیهای حد حلالیت، و بنا بر این توانایی تعیین آنکه در دمای معین برای ترکیب آلیاژی معین چه فازی (یا فازهایی) موجود خواهد بود.

۰۲. تعیین ترکیب شیمیایی فاز در حد حلالیت آن.

۰۳. محاسبه مقادیر نسبی دوفاز به وسیله درون یابی، هنگامی که حدود حلالیت بیشتر شوند.

۰۴. بررسی کردن آلیاژهای تجارتي مثل برنج، مفرغ، لحیم، نقره استرلینگ و آلومینیم، تحت شرایط تعادل و پیش بینی روابط فازی.

۰۵. آشناسدن با ویژگیهای ساختاری و ترکیبی فریت (α)، استنیت (γ)، و کاربید (Fe_3C).

۰۶. آشنایی کافی با نمودار فازی $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ به طوری که در تعریفات بعدی پیرامون عملیات گرمایی فولادها بتوان سریعاً آن را در نظر آورد. این شامل (الف) دما، ترکیب و واکنش اوتکتوئید و (ب) حدود حلالیت کربن در α و γ می شود.

۰۷. بررسی کمی تغییرات فازی، که در حین تجزیه استنیت (الف) در فولاد ساده کربنی ($\text{Fe}-\text{C}$) یا (ب) در فولاد کم آلیاژ ساده ($\text{Fe}-\text{C}-\text{X}$) با آن برخورد می کنیم، در این صورت آشنایی با الگوی نامگذاری AISI-SAE نیز لازم است.

۹-۱ روابط کیفی فازها

در سه فصل قبلی به ترتیب فازهای فلزی، آلی، و سرامیکی مورد بحث قرار گرفت و بستگی خواص این فازها با ساختار آنها مشخص شد. در هر يك از فصلهای فوق فقط مواد «تك فاز» در نظر گرفته شد. اگرچه بسیاری از مواد مهندسی اساساً از يك فاز تشکیل شده اند* ولى بیشتر آنها مخلوطی از فازها- ایند مثلاً مسی توان فولاد، لحیم، سیمان پرتلند، چرخهای سنگ زنی، و پلاستیکهای تقویت شده را نام برد. مخلوط بودن دو یا چند فاز در ماده سبب واکنشهایی بین فازها می شود و خواص حاصل معمولاً با خواص تك تك فازها فرق دارد. اغلب این خواص را می توان با تغییر شکل یا «پراکندگی» فازها بهبود بخشید (فصل ۱۵ را ببینید).

محلولها در مقابل مخلوطها. اجزای مختلف می توانند به صورت محلول یا مخلوط** در يك

* برای تعریف فازها به آخر بخش ۴-۵ مراجعه کنید.

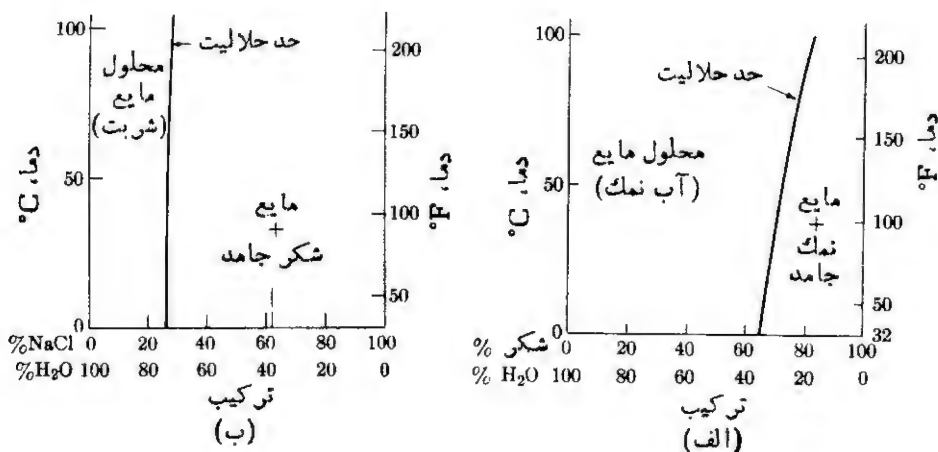
** محلول، فازی با بیش از يك جزء است؛ مخلوط ماده ای با بیش از يك فاز است.

ماده وجود داشته باشند. با محلولهای مایع آشنایی داریم و درباره محلولهای جامد نیز در بخشهای ۲-۴ و ۴-۶ و ۴-۸ بحث شد. ترکیبات شیمیایی محلولهایی تواند بسیار متنوع باشد زیرا (۱) در نقاط مختلف شبکه ساختار فاز، يك اتم ممکن است جانشین اتم دیگر شود یا (۲) اتمهایی ممکن است بین اتمهای ساختار قرار گیرند. جسم حل شونده الگوی ساختار حلال را عوض نمی کند. از طرف دیگر، مخلوط بیش از يك فاز (الگوی ساختاری) دارد. مثلاً مخلوطهایی چون ماسه و آب، لاستیک بسا پرکننده کربن، و تنگستن کاربید بسا چسب کبات را می توان نام برد که در هر کدام دوفاز مختلف وجود دارد و هر فاز آرایش اتمی مخصوص به خود را دارد.

البته مخلوط ممکن است از دو محلول مختلف تشکیل شده باشد. مثلاً در لحیم قلع - سرب یکی از فازها شامل محلول جامدی است که در آن قلع به جای بعضی از اتمهای سرب در ساختار fcc جایگزین شده است و فاز دیگر همان ساختار قلع (راست و چپ) مرکب را دارد. در دماهای بالا اتمهای سرب می توانند جانشین تعدادی از اتمهای قلع در ساختار bet شوند و بدین ترتیب لحیم ۴۰-۶۰ معمولی (۴۰% Pb - ۶۰% Sn) بلافاصله پس از انجماد حاوی دو ساختار خواهد بود که هر کدام يك محلول جامدند.

حد حلالیت مایع. شکل ۹-۱-۱ (الف) حد حلالیت شکر معمولی در آب را نشان می دهد. این منحنی نمودار حلالیت است. تمام ترکیباتی که در طرف چپ این نمودار دیده می شوند، فقط شامل يك فازند زیرا تمام شکر در فاز مایع حل می شود و شربت به وجود می آورد. با افزایش درصد شکر که در سمت راست نمودار دیده می شود که دیگر نمی توان شکر را به طور کامل در شربت حل کرد. بنابراین مخلوطی از دوفاز یعنی شکر جامد و شربت مایع حاصل می شود. این مثال تغییر حلالیت را با دما نشان می دهد و روش ساده ای را برای رسم دما (یا هر متغیر دیگر) به عنوان تابعی از ترکیب توصیف می کند. محور افقی شکل ۹-۱-۱ (الف) از چپ به راست، درصد شکر را مشخص می کند و چون مجموع اجزای تشکیل دهنده شکل باید ۱۰۰٪ باشد، درصد آب را روی همان محور از راست به چپ می توان خواند.

شکل ۹-۱-۱ (ب) حد حلالیت NaCl را در آب نشان می دهد. مطابق شکل ۹-۱-۱ (الف)، در اینجا نیز ناحیه ای وجود دارد که حاوی محلول مایع است؛ این مایع مخصوص آب نمک نامیده می شود. در اینجا حد حلالیتی وجود دارد که بسا دما افزایش می یابد. آن سوی حد حلالیت ناحیه دیگری حاوی مایع و نمک جامد موجود است. شکل ۹-۱-۲ تصاویر دیگری از سیستم $H_2O-NaCl$ را نشان می دهد. در اینجا در دو انتهای محور افقی H_2O ۱۰۰% (NaCl ۰%) و NaCl ۳۰% (H_2O ۷۰%) قرار گرفته است. با توجه به شکل دیده می شود که (۱) حد حلالیت NaCl در محلول آب نمک با کاهش دما کم می شود، (۲) حد حلالیت H_2O در محلول آب نمک نیز با کاهش دما پایین می آید، و (۳) نقطه ذوب ترکیبات میانی از نقطه ذوب یخ خالص ($0^{\circ}C$ ، $32^{\circ}F$) یا نقطه ذوب نمک خالص ($800^{\circ}C$) کمتر است. با موارد (۱) و (۳) به خوبی آشنایی



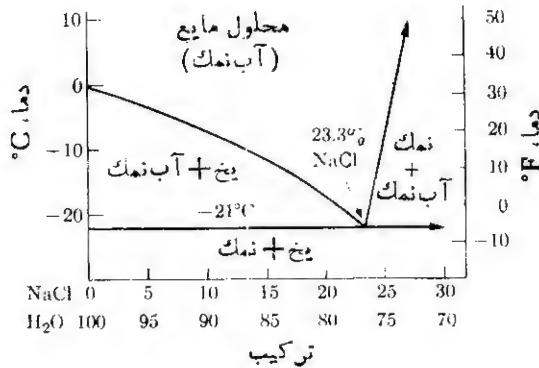
شکل ۱-۱-۹ الف) حلالیت شکر در آب. حد حلالیت شکر در آب به وسیله نمودار حلالیت، نشان داده می‌شود. باید توجه کرد که مجموع شکر و آب در هر نقطه محور افقی ۱۰۰ درصد است؛ ب) حلالیت NaCl در آب.

داریم: مورد (۲) که حلالیت محدود یخ در محلول آبی است و آشنایی کمتری با آن داریم را می‌توان با مثال ساده‌ای شرح داد. محلول نمک و آب مثلاً آب دریا با NaCl ۱٫۷٪ را تا کمتر از 0°C (32°F) سرد می‌کنیم، طبق شکل ۱-۱-۹ این محلول تا وقتی که به منهای 1°C (30.2°F) برسد هنوز کاملاً به صورت مایع است. با مشاهدهٔ هریک از دریاها می‌توان تمکداری قطب می‌توان صحت این امر را تأیید کرد. وقتی این آب نمک‌تازیر 1°C - سرد می‌شود، بلورهای یخ تشکیل می‌شود و از آنجا که محلول نمی‌تواند در آن دما بیش از ۹۸٫۳٪ آب داشته باشد. این بلورهای یخ باید از مایع جدا شوند. در 20°C - (4°F) - بیشترین مقدار H_2O در محلول آب نمک ۷۷٪ (NaCl ۲۳٪) است. این مقدار را می‌توان با تولید بر فاب در آن دما و جدا کردن یخ از این محلول دست آورد. یخ تقریباً H_2O خالص خواهد بود و مایع باقیمانده نسبت به محلول آب نمک اول، نمک بیشتری خواهد داشت (یعنی H_2O آن کمتر است).

دما و ترکیب اوتکتیک. دو منحنی حلالیت شکل ۱-۱-۹ در 21.1°C - (6°F) - و در NaCl ۲۳٫۳ - H_2O ۷۶٫۷ یکدیگر را قطع می‌کنند. این کمترین دمای است که در آن محلول آب نمک به صورت مایع باقی می‌ماند. این دما، دمای اوتکتیک نامیده می‌شود. ترکیب این مایع با نقطه ذوب پایین، ترکیب اوتکتیک است.

در شکل ۱-۱-۹ مشاهده می‌شود که آب نمک زیر هریک از منحنیهای حد حلالیت با

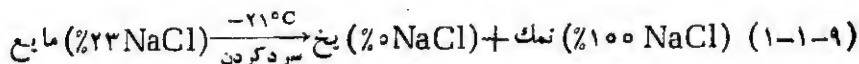
* اگر مقدار نمک دقیقاً ۱٫۷٪ نباشد، تغییر اندکی به وجود می‌آید.



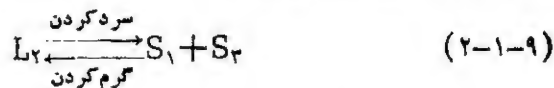
شکل ۲-۱-۹- حلالیت نمک NaCl در محلول آب نمک (خط رو به بالا در سمت راست) و حلالیت یخ در آب نمک (منحنی سمت چپ).

فاز جامد همراه است. در طرفی که H_2O در آن بیشتر است، مخلوط از یخ و آب نمک تشکیل شده است؛ در طرف دیگر اوتکتیک، مخلوط حاوی NaCl جامد و آب نمک است. زیر دمای اوتکتیک مخلوط دو فاز H_2O جامد (یخ) و NaCl جامد (نمک) وجود دارد.

واکنشهای اوتکتیک. آب نمکی نمکی با ترکیب اوتکتیک ($23\text{ NaCl}-77\text{ H}_2\text{O}$) با سرد شدن از دمای اوتکتیک از حالت محلول مایع تنها به صورت دو فاز جامد تغییر شکل می یابد.

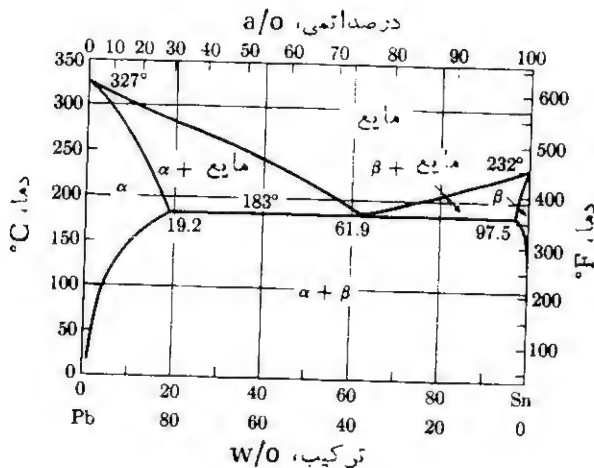


گرم کردن واکنش را عکس می کند. واکنش اوتکتیک را می توان به صورت کلی زیر نوشت



که در آن زیر نویسها نمایانگر مقدار بیشتری از يك جزء هستند.

آلیاژهای اوتکتیک. در زمانهای قدیم مردم کشف کرده بودند که با انتخاب مخلوطهای مناسب از دو یا چند فلز می توان آلیاژهایی با نقطه ذوب پایین به دست آورد. یکی از آلیاژهایی که با آن آشنایی داریم لیجم ۴۰-۶۰ معمولی (۴۰ Sn-۶۰ Pb) است. طبق شکل ۳-۱-۹، این آلیاژ دارای ترکیب اوتکتیکی است که در 183°C ذوب می شود. این لیجم در مدارهای الکتریکی مصارف بسیار دارد زیرا می توان با کمینه گرما اتصال فلزی برقرار کرد. اگر لیجم حاوی سرب بیشتری باشد (مثلا ۲۰ Sn-۸۰ Pb) مایع در



شکل ۳-۱-۹ نمودار Pb-Sn این نمودار ترکیبات فازی را نشان می‌دهد و محاسبه مقدار فازها را برای هر مخلوطی از سرب- قلع، در هر دمایی میسر می‌سازد.

حین سرد شدن در 280°C از سرب اشباع می‌شود. بنابراین در گستره 100°C تا 183°C مخلوطی از مایع و جامد وجود خواهد داشت.

حد حلالیت جامد. تفاوت شکل ۳-۱-۹ با شکل ۲-۱-۹ در آن است که جامد غنی از سرب می‌تواند اتمهای قلع را در ساختار خود حل کند. (یخ نمی‌تواند مقدار قابل ملاحظه‌ای NaCl در ساختار بلوری خود حل کند). مقدار آن از ۲۹٪ اتم قلع (۱۹ درصد وزنی) درجا غنی از سرب در 183°C تا ۱۵ درصد اتمی (۶ درصد وزنی) قلع در 300°C تغییر می‌کند. همچنین جامد غنی از قلع در 183°C می‌تواند حاوی ۲۵ درصد وزنی (۱۵ درصد اتمی) سرب باشد. معمولاً این دو فاز جامد را به ترتیب با α و β نشان می‌دهند.

حد حلالیت جامد در دمای اوتکتیک دارای بیشینه‌ای است. هم زیر و هم بالای 183°C ، مقدار قلع محلول در جامد α غنی از سرب با ساختار fcc، کاهش می‌یابد. به همین ترتیب حداکثر ۲۵ درصد وزنی سرب در جامد β غنی از قلع با ساختار bcc، در 183°C محلول است.

نام و نشانه فازها. در فصلهای ۴ و ۶ اسامی بعضی از فازهای «محلول جامد» ذکر شد. برنج، فاز fcc روی در مس است و ونفره استرلینگ فاز محلول جامد مس در نقره fcc است. بعداً خواهیم دید که فاز آهن bcc که در آن ماده‌ای حل شده باشد، فریت نامیده می‌شود. همچنین آهن fcc را که عناصری به آن اضافه شده باشد، استنیت می‌نامند.

استفاده از حروف یونانی به جای نام فازها بسیار متداول است و این به خاطر ساده بودن نامگذاری است. بنابراین α و β فازهای سیستم Pb-Sn هستند؛ درحالی که سرب و قلع اجزای این سیستم اند. با وجود آنکه α ساختاری مانند سرب خالص دارد ولی فاز α الزاماً سرب خالص نیست.

مثال ۹-۱-۱ طبق شکل ۹-۱-۱ (الف) شربتی در 20°C (68°F) می تواند حاوی ۶۷٪ شکر (۳۳٪ آب) و در 100°C (212°F) حاوی ۸۳٪ شکر باشد. صد گرم شکر و ۲۵ گرم آب را مخلوط کرده و می جوشانیم تا تمام شکر حل شود. در خلال سرد شدن مقدار شکر از حد حلالیت تجاوز کرده به طوری که (با گذشت زمان) شکر اضافی از شربت جدا می شود. در حال تعادل، نسبت وزنی شربت به شکر اضافی در 20°C چقدر است؟

حل: مینا: ۱۰۰ گرم شکر + ۲۵ گرم H_2O = ۱۲۵g در 20°C

$$100\text{g} = x + (125 - x) \times 0.67 = \text{اضافی} + \text{مقدار شکر در شربت}$$

$$x = 49.25\text{g} \text{ اضافی}$$

$$\text{شربت } 75.75\text{g} = 125\text{g} - 49.25\text{g}$$

$$\frac{\text{شربت}}{\text{شکر اضافی}} = \frac{75.75\text{g}}{49.25} = 1.54$$

توضیح. در دمای بالاتر تمام شکر حل می شود و يك تك فاز شربت به وجود می آید. شکل [۹-۱-۱] (الف). وقتی مخلوط سرد می شود، حد حلالیت برای شربت «۸۰ شکر-۲۰ آب» در 87°C (189°F) خواهد بود. با این حال قبل از اینکه فاز اضافی (در اینجا شکر) شروع به جدا شدن کند، قدری فوق سرمایش به وجود می آید. در این مورد فوق سرمایش می تواند تا دمای اتاق ادامه یابد و آغاز جدا شدن را تا حد قابل ملاحظه ای به تأخیر اندازد. در فلزات و دیگر مواد نیز حالات مشابهی از فوق اشباع به وجود می آید. ه

مثال ۹-۱-۲ آب نمکی حاوی ۹٪ NaCl (۹۱٪ وزنی H_2O) است. چند گرم آب (به ازای ۱۰۰ گرم آب نمک) باید تبخیر شود تا محلول در 50°C به صورت اشباع در آید؟

حل: مینا: ۱۰۰ گرم آب نمک = ۹ گرم NaCl + ۹۱ گرم H_2O

از شکل ۹-۱-۱ (ب)، حلالیت NaCl در آب نمک ۲۷٪

* نشانه α تقریباً برای تمام سیستمها به عنوان فاز اول به کار می رود. ولی این امر مسئله ای به وجود نمی آورد. (همچنان که در محاسبات جبری مکرراً از حروف استفاده می شود بدون آنکه موجب اشتباه در نشانه گذاری شود.)

مواد چند فاز: نمودارهای فازی ۴۱۵

$$x/0.073 = 9g/0.027 = \text{مقدار آب نمك اشباع شده بر حسب گرم}$$

$$x = 243g H_2O \text{ برای اشباع}$$

$$91g - 243g = 667g \text{ باید تبخیر شود}$$

شق دیگر، آن است که مقدار نمك برابر ۲۷٪ آب نمك باقی مانده پس از تبخیر است

$$(0.09)(100g) = 0.027(100 - y)$$

$$y = 667g$$

توضیح. معمولاً ترکیب مایعات و جامدات بر حسب درصد وزنی بیان می شود مگر آنکه به صورت دیگری ذکر شده باشد.

مثال ۳-۱-۹ آب نمکی با ۴۰ گرم آب و ۱۰ گرم NaCl تا $10^{\circ}C$ - ($14^{\circ}F$) سرد شده است. الف) این آب نمك را در بشر آزمایشگاهی قرار می دهیم. چه مقدار نمك می تواند در آن حل شود؟ ب) آب نمك ۴۰-۱۰ مشابهی در بشر دوم قرار می گیرد. چه مقدار یخ می توان به آن اضافه کرد، به طوری که از حد حلالیت تجاوز نکند؟

حل: با استفاده از منحنیهای حلالیت شکل ۲-۱-۹

$$\text{الف) } 25\% = \text{حد حلالیت NaCl در } 10^{\circ}C -$$

که ۷۵٪ آب به جا می گذارد

$$NaCl = 0.025(50 + x) = 10 + x \text{ (گرم)}$$

$$x = 333g NaCl \text{ اضافه شده}$$

$$\text{ب) } 86\% H_2O = \text{حد حلالیت در } 10^{\circ}C -$$

که NaCl ۱۴٪ به جا می گذارد

$$H_2O = 0.086(50 + y) = 40 + y \text{ (گرم)}$$

▲

$$y = 2194g H_2O \text{ اضافه شده}$$

مثال ۴-۱-۹ وقتی دما به $10^{\circ}C$ - ($14^{\circ}F$) می رسد درخیابانها نمك می باشند. قسمتی از یخ آب می شود و آب نمك تشکیل شده با H_2O به حالت اشباع در می آید. نود گرم از این آب نمك روی ماشین شما ریخته شده است. چند گرم NaCl همراه آن است.

حل: از شکل ۲-۱-۹، حد حلالیت در $10^{\circ}C -$ برابر $86\% H_2O$ در آب نمك است. مقدار NaCl چنین است

$$0.14(90g) = 12.6g NaCl$$

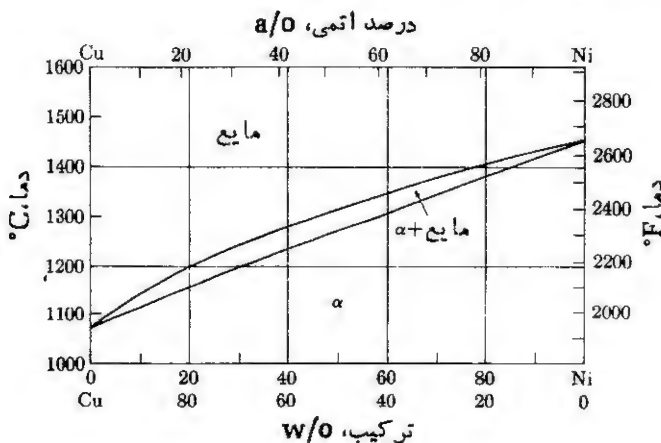
توضیح. به خواننده توصیه می‌شود که از خط کش میلی متری شفاف کوچکی استفاده کند. این کار امکان دقیق‌تر خواندن حدود حلالیت را میسر می‌سازد. بسیاری از نمودارهای فازی با دقت $\pm 1\%$ در مقیاسهای بزرگ تر رسم شده‌اند و سپس عکس آنها کوچک شده است. بنابراین دقت محاسبات معمولاً به دقت در خواندن شکل محدود می‌شود. ▲

۹-۲ نمودارهای فازی (نمودارهای تعادلی)

شکل ۹-۱-۳ نمودار فازی سیستم سرب-قلع است. این نمودار همچون «نقشه‌ای» است که در هر ترکیب و دمای، فازهای موجود را مشخص می‌کند، به شرط آنکه آلیاژ در حال تعادل باشد یعنی تمام واکنشهای ممکن کامل شده باشد.

مثلاً در 50% قلع و 100°C نمودار فازی وجود دو فاز جامد را نشان می‌دهد. یکی α که محلول جامد غنی از سرب است و مقداری قلع در آن حل شده است و دیگری β که تقریباً قلع خالص با مقدار خیلی کمی سرب حل شده در آن است. در 200°C ، آلیاژی با 10% قلع و 90% سرب کاملاً در ناحیه‌ای واقع می‌شود که تماماً شامل فاز α است. (این فاز، محلول جامد سرب است که مقداری قلع در آن حل شده است). در همین دما، ولی با 30% قلع و 70% سرب، نمودار فازی مخلوط دو فاز مایع و محلول جامد α را نشان می‌دهد؛ اگر این آلیاژ تا 300°C گرم شود، تماماً مایع خواهد شد.

البته محدوده‌ی هر فاز در نمودارهای تعادلی به سیستم آلیاژی خاص آن بستگی دارد. وقتی مس و نیکل با هم مخلوط می‌شوند نمودار فازی آنها مانند شکل ۹-۲-۱ خواهد بود. این نمودار فازی، نسبتاً ساده است زیرا فقط شامل دو فاز است. در قسمت‌های پایین

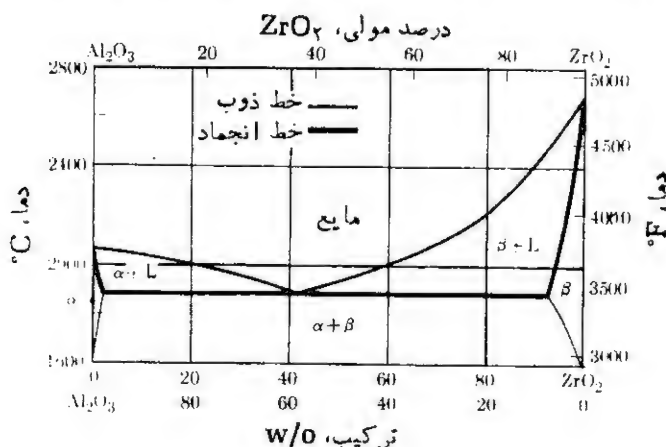


شکل ۹-۲-۱ نمودار Cu-Ni. تمام آلیاژهای جامد فقط شامل یک فازند و این فاز fcc است.

این نمودار، تمام ترکیبات فقط يك محلول جامد و بنابراین يك ساختار بلوری تشکیل می‌دهند. مس و نیکل، هر دو ساختار مکعبی با وجود مرکزدار دارند. از آنجا که اندازه اتمهای آنها تقریباً یکی است در 1000°C اتمهای مس و نیکل با هر نسبتی می‌توانند جایگزین یکدیگر شوند. هنگامی که آلیاژی با ۶۰ درصد مس و ۴۰ درصد نیکل گرم شود، تا حدود دمای 1235°C (2255°F) فاز جامد وجود دارد. از این دما تا 1275°C (2330°F) محلولهای جامد و مایع هر دو وجود خواهند داشت و بالاتر از 1275°C فقط فاز مایع باقی می‌ماند.

گستره‌های انجماد. همان طور که در نمودارهای قبلی نشان داده شد، گستره دمایی که در آن انجماد به وقوع می‌پیوندد با ترکیب آن آلیاژ تغییر می‌کند و اگر به لحیمی نیاز باشد که در يك دما به طور کامل منجمد نشود این وضعیت موجب می‌شود که لحیمکار، مثلاً آلیاژ غنی از سرب که به عنوان لحیم «پاک‌کننده» به کار می‌رود، را انتخاب کند. اگر لحیم Sn-۲۰-Pb ۸۰ انتخاب شود، گستره انجماد آن از 28°C تا 183°C خواهد بود حال آنکه گستره انجماد لحیم Sn-۴۰-Pb ۶۰ فقط از 188°C تا 183°C است.

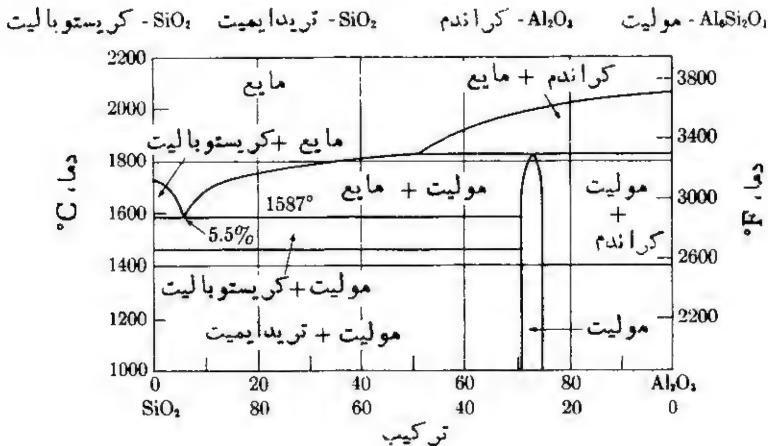
در این زمینه واژه‌های خط ذوب به عنوان مکان هندسی دماهایی که بالاتر از آنها تمام ترکیبها مایع اند و خط انجماد به عنوان مکان هندسی دماهایی که پایینتر از آنها تمام ترکیبات جامدند، به کار می‌رود. هر نمودار فازی با دو یا چند جزء باید «خط ذوب»، خط انجماد و گستره انجماد میانی را نشان دهند. اجزای ترکیب چه فلزی باشند چه غیر فلزی



شکل ۲-۲-۹ نمودار Al_2O_3 - ZrO_2 . مانند تمام نمودارهای فازی خط ذوب حد کمترین دما را برای مایع تنها نشان می‌دهد. خط انجماد حد بالایی برای ماده کاملاً جامد است. گستره انجماد جامد+مایع بین این دو قرار دارد. این دو در نقطه اوتکتیک و جایی که تک فازها ذوب می‌شوند یکدیگر را قطع می‌کنند.

(شکل ۹-۲-۲)، در نمودار فازی آنها نقاطی وجود دارد که خط ذوب و خط انجماد یکدیگر را قطع می‌کنند. برای جزء خالص، این نقطه روی لبه نمودار واقع می‌شود. وقتی ماده خالص گرم می‌شود، تا رسیدن به نقطه ذوب به صورت جامد باقی می‌ماند، سپس قبل از آنکه دما افزایش یا بدکاملاً به مایع تبدیل می‌شود. خط انجماد و خط ذوب در اوتکتیک یکدیگر را قطع می‌کنند. در شکل ۹-۱-۳ لحیم مایعی مرکب از ۹۱ درصد قلع و ۸ درصد سرب پایتتراز دمای اوتکتیک تماماً جامد و بالاتر از آن تماماً مایع است و در دمای اوتکتیک سه فاز با هم وجود دارند [درسیستم Pb-Sn این سه فاز عبارتند از $(\alpha + \text{مایع} + \beta)$].

پوشه‌های همدم. اگر روی نمودار فازی، خطی عرضی در یک دمای ثابت (به نام همدم) رسم شود، مجموعه‌ای از نواحی ۲۰۱ فازی را متناوباً نشان می‌دهد. مثلاً برای نمودار $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ شکل ۹-۲-۳ در 1650°C (3000°F) ایسن سری به صورت ۱-۲-۱-۲-۱-۲-۱ است. در مورد SiO_2 خالص فقط یک فاز (به نام کریستوبالیت) وجود دارد و مقدار Al_2O_3 در محلول جامد قابل اغماض است*. بنابراین با افزودن Al_2O_3 فاز دوم (مایع) ظاهر خواهد شد. ناحیه دو فازی شامل مایع کریستوبالیت است. بین ۴ درصد Al_2O_3 (۹۶٪ SiO_2) و ۸ درصد Al_2O_3 (۹۲٪ SiO_2) مایع می‌تواند تمام SiO_2 و Al_2O_3 موجود



شکل ۹-۲-۳ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ نمودار فازهای غیر فلزی به همان روش فلزات به کار می‌رود. تنها اختلاف آنها این است که در غیر فلزات زمان بیشتری برای رسیدن به تعادل لازم است.

* البته حلالیت اندکی وجود دارد ولی آنقدر کم است که آن را نمی‌توان روی نمودار فازی نشان داد.

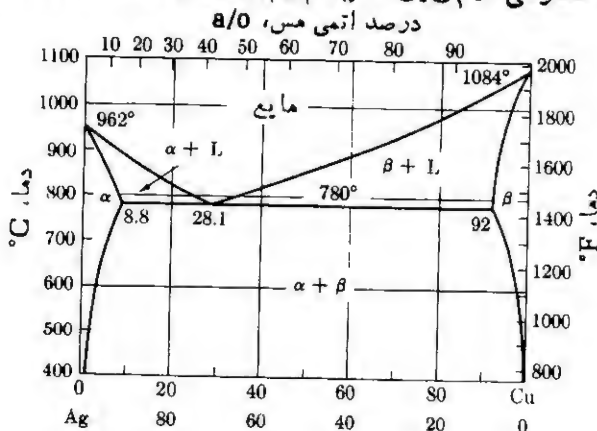
را در خود حل کند بنا براین فقط یک فاز وجود دارد. وقتی بیش از ۸٪ Al_2O_3 (کمتر از ۹۲٪ SiO_2) وجود داشته باشد، از حد حلالیت Al_2O_3 در مایع فزاینده می‌رود و مولیت جامد رسوب می‌کند، دو فاز مایع و مولیت با هم وجود دارند. * گستره محلول جامد مولیت، از Al_2O_3 ۷۱٪ (یعنی SiO_2 ۲۹٪) تا Al_2O_3 ۷۵٪ (یعنی SiO_2 ۲۵٪) است. در این گستره تنها یک فاز پایدار است؛ زیرا SiO_2 و Al_2O_3 هر دو را در بر می‌گیرد. سپس ناحیه‌ای دوفازی شامل مولیت و کرائندم (Al_2O_3) وجود دارد که تا خط انتهایی سمت راست نمودار فازی ادامه می‌یابد. در انتها تنها یک فاز Al_2O_3 وجود دارد که کرائندم نام دارد.

مثال ۹-۲-۱ نقره استرلینگ که آلیاژی از ۹۲٫۵٪ نقره و ۷٫۵٪ مس است (شکل ۹-۲-۲) از دمای محیط تا $1000^{\circ}C$ ($1830^{\circ}F$) به آهستگی گرم می‌شود. با ادامه گرمایش چه فازهایی به وجود می‌آید؟

جواب:

$\alpha + \beta$	از دمای اتاق تا $760^{\circ}C$
فقط α	$760^{\circ}C$ تا $800^{\circ}C$
مایع + α	$800^{\circ}C$ تا $900^{\circ}C$
فقط مایع	$900^{\circ}C$ تا $1000^{\circ}C$

مثال ۹-۲-۲ مخلوطی از ۹۰٪ SiO_2 و ۱۰٪ Al_2O_3 در $1800^{\circ}C$ ذوب شده است و



شکل ۹-۲-۴ نمودار Ag-Cu.

* اگر مقدار Al_2O_3 از ۸ درصد اندکی بیشتر شود، اندکی مولیت نیز وجود خواهد داشت. هنگامی که به سمت راست این ناحیه دوفازی نزدیک شویم مقدار کمی مایع باقی خواهد ماند.

سپس بسیار آهسته تا 1400°C سرد می‌شود، چه فازی (یا فازهایی) در حین سرد کردن به وجود می‌آید؟

جواب:

از 1700°C تا 1800°C	فقط مایع
1587°C تا 1700°C	مایع + مولیت ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$)
1470°C تا 1587°C	مولیت + کریستوبالیت (SiO_2)
کمتر از 1470°C	مولیت + تریدایمیت (SiO_2)

توضیح. البته باید در 1587°C سه فاز (مایع + مولیت + کریستوبالیت) وجود داشته باشد، زیرا ماده از ناحیه (مایع + مولیت) به ناحیه (کریستوبالیت + مولیت) می‌رود، به همین ترتیب در 1470°C نیز سه فاز وجود دارد. سرد کردن باید بسیار آهسته باشد زیرا فرایند تغییر پیوندهای قوی $\text{Si}-\text{O}$ از ساختاری به ساختار دیگر بسیار کند انجام می‌گیرد. سیلیس خالص دارای سه صورت چندشکلی متداول است؛ کوآرتز در دماهای پایین، و کریستوبالیت و تریدایمیت در دماهای بالا. ▲

مثال ۳-۲-۹ با مراجعه به شکل ۹-۲-۴ برای سیستم $\text{Ag}-\text{Cu}$ (الف) مکان خط ذوب و خط انجماد را معین کنید؛ (ب) در محل تقاطع این دو چند فاز وجود دارد؟

حل:

الف) خط ذوب: 962°C در 100% Ag تا 780°C در 71.9% Ag (28.1% Cu)، تا 1084°C در 100% Cu .
خط انجماد: 962°C در 100% Ag تا 780°C در 91.2% Ag (8.8% Cu)، باقیمانده در 780°C تا 92% Cu (8% Ag) تا 1084°C در 100% Cu .
ب) بایک جزء تنها (فقط Ag یا فقط Cu)، زمانی که دو خط انجماد و ذوب یکدیگر را قطع می‌کنند دو فاز وجود دارد.
با دو جزء (Ag و Cu)، در محل تقاطع خطوط ذوب و انجماد (در نقطه اوتکتیک) سه فاز (α + مایع + β) وجود دارد.

توضیح. در گستره دمای بین خط انجماد و خط ذوب نمودار فازی دوجزئی یادوتایی، همیشه دو فاز وجود دارد. ▲

مثال ۴-۲-۹ با مراجعه به نمودار $\text{Al}-\text{Mg}$ (شکل ۹-۵-۴) قانون ۰-۲-۱-۲-۱۱ در الف) (500°C و ب) (200°C) اعمال کنید.

جواب:

	α	$(\alpha + L)$	Liq	$(L + \epsilon)$	ϵ	
% Mg	0	11	29	76	92	100
% Al	100	89	71	24	8	0

(الف)

	α	$(\alpha + \beta)$	β	$(\beta + \beta')$	β'	$(\beta' + \gamma)$	γ	$(\gamma + \epsilon)$	ϵ	
% Mg	0	3	35	37	~41	~42	49	~56	96	100

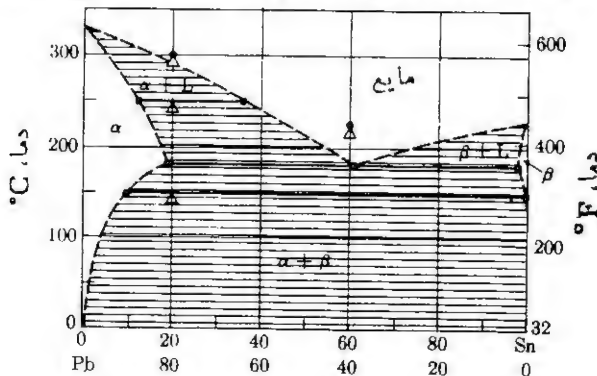
(ب)

توضیح. خط چینهای موجود روی نمودار فازی بهترین برآورد براساس اطلاعات موجود است.

۳-۹ ترکیب شیمیایی فازها

نمودار فازی علاوه بر اینکه مانند يك «نقشه» مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیب شیمیایی فازهایی که تحت شرایط تعادل، پس از کامل شدن تمام واکنشها، موجودند را نیز نشان می دهد. این اطلاعات به همراه دانستنیهای در باره مقدار فازها (بخش ۹-۴) برای دانشمندان و مهندسانی که با توسعه، انتخاب، و کاربرد مواد در طرح محصولات سروکار دارند بسیار مورد استفاده قرار می گیرد.

نواحی يك فاز. ترکیب شیمیایی يك تك فاز خود به خود معلوم می شود زیرا ترکیب آن همان ترکیب آلیاژ است. همان طور که انتظار می رود، از آنجا که، مثلا آلیاژ (۶۰ Sn-۴۰ Pb) در 225°C (شکل ۹-۳-۱) فقط به صورت مایع است و ترکیب این



شکل ۹-۳-۱ ترکیب فازها (آلیاژهای Pb-Sn). در 150°C آلیاژ $80\text{ Pb}-20\text{ Sn}$ شامل α و β است. ترکیب شیمیایی α به وسیله منحنی حلالیت مشخص می شود. در این دما حد حلالیت برابر با $10\% \text{ Sn}$ [و $90\% \text{ Pb}$ در فاز α (fcc)] است. به متن مراجعه کنید.

مایع باید همان ۴۰-۶۰ باشد. این موضوع در مورد نواحی دیگر نمودار که حاوی محلول جامد تک فازند نیز صادق است.

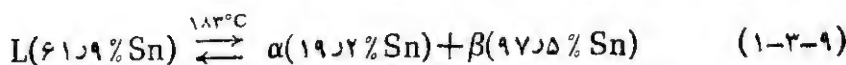
آنچه در اینجا مورد بحث قرار می گیرد ترکیب شیمیایی فازها (و ترکیب کای آلیاژ) بر حسب اجزای تشکیل دهنده آن (در این مورد سرب و قلع) است.

نواحی دوفازی. در پاراگراف اول ترکیب شیمیایی دو فاز را بدون ذکر دلیل به دست می آوریم و در پاراگراف دوم به شرح دلایل آن می پردازیم.

ترکیب شیمیایی دوفاز در دو انتهای منحنی همدمايي که در ناحیه دوفاز رسم می شود قرار دارد. مثلاً لحیم ۲۰ Pb-۸۰ Sn را در 150°C در نظر بگیرد. مطابق با شکل ۹-۳-۱، α دارای ترکیب ۱۰ w/o قلع (بنا بر این ۹۰ w/o سرب) و ترکیب β تقریباً ۱۰۰ w/o قلع است. همدماهای دیگر شکل ۹-۳-۱، تعیین ترکیب دوفاز را در هر آلیاژ Sn-Pb و در هر دمایی میسر می سازند.

اساس این روش آن است که حد حلالیت قلع در α در 150°C برابر با ۱۰ w/o است. چون آلیاژ فوق شامل ۲۰ w/o قلع است، بنابراین α از قلع اشباع شده و قلع اضافی در β موجود است. برعکس چون حد حلالیت سرب در β کمتر از ۱ w/o است، بنابراین تقریباً تمام سرب موجود باید در فازی غیر از β یعنی در α وجود داشته باشد.

دماهای سه فازی و واکنشهای اوتکتیک. مایعی که دارای ترکیب اوتکتیک است (در مورد سیستم Pb-Sn، $61.9\text{ Pb}-38.1\text{ Sn}$) در دمای اوتکتیک (183°C) به دو فاز جامد (α و β) تجزیه می شود. بنابراین در این دما فقط سه فاز می توانند در تعادل باشند. هرگاه چنین آلیاژی گرم شود، دوفاز جامد این لحیم ذوب می شود و یک فاز مایع تشکیل می شود. این واکنش دوطرفه را می توان به صورت زیر بیان کرد



در این رابطه ترکیب سه فازی که در 183°C در حال تعادل اند، بر حسب قلع بیان شده است.*

واکنش رابطه (۹-۳-۱) که شامل یک مایع و دو جامد است واکنش اوتکتیک نام دارد و صورت کلی آن (که قبلاً ارائه شد) چنین است



در رابطه فوق اعداد ۱ و ۲ و ۳ مقدار یکی از دو جزء را به ترتیب صعودی نشان می دهد.

* به جای نوشتن مقدار قلع می توان مقدار سرب یعنی 38.1 Pb ، 8.8 Pb و 2.5 Pb را به ترتیب برای L ، α و β نوشت.

مواد چند فاز: نمودارهای فازی ۴۲۳

مثال ۱-۳-۹ درسیستم Cu-Ni (شکل ۱-۲-۹) در 1300°C ، الف) حد خلالت مس در جامد α چقدر است؟ ب) حد خلالت نیکل در مایع چقدر است؟ ج) ترکیب شیمیایی فازها را در آلیاژ ۵۵ Ni-۴۵ Cu، در 1300°C معین کنید.

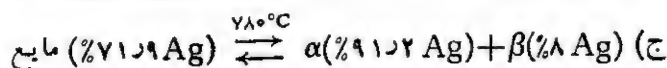
جواب: الف) Cu ۲۲ w/o؛ ب) Ni ۴۵ w/o؛ ج) (۴۲ Cu-۵۸ Ni)؛ α ؛ (۵۵ Cu-۲۵ Ni)؛ L.

توضیح. حد خلالت است که ترکیب شیمیایی فازها را در ناحیهٔ دوفاز معین می‌کند. Δ

مثال ۲-۳-۹ آلیاژی از ۶۰ Cu-۴۰ Ag (شکل ۲-۲-۹) به آهستگی از 1000°C تا دمای اتاق سرد می‌شود. الف) چه فازهایی در حین سرد شدن حاصل می‌شوند؟ ب) ترکیب این فازها چیست؟ ج) واکنش اتکتیک آن را بنویسید.

جواب: الف) و ب)

دما	α	مایع	β
1000°C	—	۶۰ Cu-۴۰ Ag	—
۸۰۰	—	۳۴ Cu-۶۶ Ag	۹۲ Cu-۸ Ag
۷۸۰	۹۱۲ Ag-۸۸۸ Cu	۲۸۱۱ Cu-۷۱۰۹ Ag	۹۲ Cu-۸ Ag
۶۰۰	۹۶۵ Ag-۳۵ Cu	—	۹۸ Cu-۲ Ag
۴۰۰	۹۹ Ag-۱ Cu	—	تقریباً ۱۰۰ Cu
۲ (برونایی شده)	تقریباً ۱۰۰ Ag	—	تقریباً ۱۰۰ Cu



توضیح. در تقریباً 890°C مایع از مس اشباع می‌شود. ترکیب اولین ذرات β که در این دما جدا می‌شود ۷ Ag-۹۳ Cu است. Δ

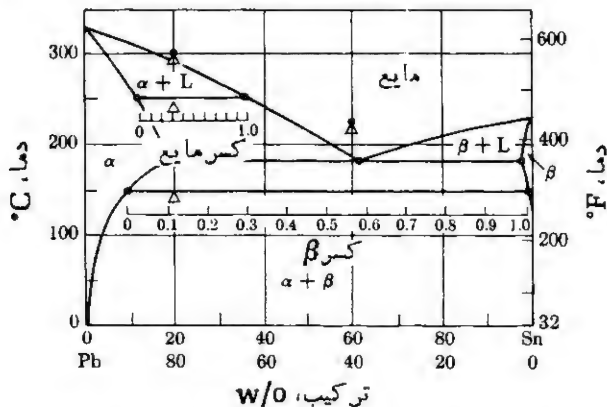
۴-۹ کمیت فازها

علاوه بر (۱) تعیین فازهای پایدار یا تعادلی (بخش ۲-۹) و (۲) به دست آوردن ترکیب شیمیایی آنها از روی نمودارهای فازی (بخش ۳-۹)، می‌توانیم (۳) کمیت فازهایی را که در شرایط تعادل وجود دارند معین کنیم. این امر در فصل ۱۰ که از خواص مواد چند فاز صحبت می‌شود مفید خواهد بود.

نواحی یک فاز. بار دیگر چنانکه در بخش ۹-۳ گفته شد مقادیر فازها به طور خودکار تعیین می شوند. مثلاً ۲۲۵ گرم از آلیاژ ۲۰ Sn-۸۰ Pb در 300°C فقط مایع است و مقدار آن هم ۲۲۵ گرم است. به عبارت دیگر می توان گفت که تمام (یا ۱۰۰٪) آلیاژ مایع است و در این حال لازم نیست که وزن دقیق آلیاژ موجود ذکر شود.

نواحی دو فاز. مقادیر فازهایی را که در نواحی دوفازی نمودارها وجود دارند (یا کسر مقدار آنها) ابتدا بدون توجه به دلایل آن به دست می آوریم. و در پاراگراف بعد دلایل منطقی آن ذکر می شود. مقادیر دوفاز موجود با ددونایی ترکیب آلیاژ بین ترکیب دوفاز به دست می آید. برای روشن شدن مطلب دوباره لحیم ۲۰ Sn-۸۰ Pb را در 150°C در نظر بگیرید. بنابر شکل ۹-۴-۱، ترکیب شیمیایی آلیاژ در این دما (۲۰ Sn-۸۰ Pb) در نقطه ای به فاصله ۱۱،۰۵، بین ترکیب α (یعنی ۱۰ Sn-۹۰ Pb) و ترکیب β (۱۰۰ Sn) و α برابر با ۸۹،۰۵) از کل مقدار لحیم است.* می توان این مقادیر را به صورت α ۸۹٪ و β ۱۱٪ نیز گزارش کرد.

به عنوان مثال دیگر همین آلیاژ را در 250°C در نظر بگیرید. بنابر شکل ۹-۴-۱ دوفاز α (۱۲ Sn-۸۸ Pb) و β (۳۶ Sn-۶۴ Pb) وجود دارند. ترکیب کلی این آلیاژ که ۲۰ Sn-۸۰ Pb است به فاصله ۱/۳ بین ترکیب شیمیایی α و ترکیب شیمیایی مایع



شکل ۹-۴-۱ کمیت فازها (در آلیاژهای Pb-Sn). همان طور که در شکل ۹-۳-۱ دیدیم آلیاژ ۲۰ Sn-۸۰ Pb در 150°C دارای دو فاز α و β است. به ددونایی کسر β برابر ۱۱،۰۵ می شود. همین آلیاژ در 250°C شامل ۳۳،۰۵ مایع (و α ۶۷،۰۵) است. به متن مراجعه کنید.

* در نتیجه، اگر ۲۲۵ گرم لحیم موجود باشد، تقریباً ۲۰۰ گرم از α و ۲۵ گرم از β وجود خواهد داشت.

قرار دارد. بنابراین در 250°C کسر مقدار مایع برابر $1/3$ و کسر مقدار α برابر $2/3$ مقدار کل آلیاژ است.

باید توجه کرد که مقادیر فوق بر حسب فازها بیان شده‌اند یعنی α و β یا α و L . حال آنکه ترکیب شیمیایی بر حسب اجزاء بیان شد یعنی Pb و Sn . برای پیروی از روش ذکر شده مقیاس (طول) قابل تغییری لازم است زیرا طول همدمای بین دو منحنی حد حلالیت، پیوسته تغییر می‌کند. درون‌یابی با استفاده از خط کش میلی‌متری نیز میسر است.* همچنین می‌توان به تقسیم‌بندیهای روی محور افقی توجه کرده این مقادیر را به دست آورد.

موازنه مواد. دلیل اساسی روش درونیابی فوق، از موازنه مواد ناشی می‌شود به عبارت دیگر کل برابر با مجموع قسمت‌هاست. در مثال بالا در 250°C ، مقدار سرب در کل آلیاژ برابر است با مقدار سرب در α به اضافه مقدار سرب در مایع.

فرض کنید در 250°C ، 600 گرم لحیم $\text{Pb}-20\text{Sn}$ داشته باشیم، یعنی 480 گرم سرب (و 120 گرم قلع). در این صورت A گرم α ($\text{Pb}-12\text{Sn}$) و L گرم مایع ($\text{Pb}-36\text{Sn}$) وجود دارد که ترکیب آنها در شکل‌های ۹-۳-۱ و ۹-۴-۱ دیده می‌شود. بدیهی است که

$$A + L = 600 \text{ گرم}$$

بر اساس ترکیب شیمیایی دوفاز و ترکیب کلی آلیاژ، موازنه سرب به صورت زیر در می‌آید

$$0.88A + 0.64L = 0.80(A + L) \quad (9-4-1)$$

یا در این مورد $A = 2L$ یعنی 200 گرم مایع و 400 گرم α ، به عبارت دیگر همان مقادیر $1/3$ و $2/3$ که در بالا به دست آوردیم.

رابطه (۹-۴-۱) را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت

$$C_x(X) + C_y(Y) = C(X + Y) \quad (9-4-2)$$

به طوری که C_x و C_y به ترتیب ترکیب شیمیایی فازهای x و y هستند. C ترکیب کل آلیاژ است. X و Y مقادیر فازهای x و y هستند. رابطه جبری (۹-۴-۲) را می‌توان بدیگی از دو صورت زیر نوشت

$$\frac{X}{X + Y} = \frac{C_y - C}{C_y - C_x} \quad (9-4-3, \text{الف})$$

یا

* توصیه می‌شود از خط کش میلی‌متری شفاف کوچکی استفاده شود.

$$\frac{X}{X+Y} = \frac{C_x - C}{C_x - C_y} \quad (ب) \quad (۳-۴-۹)$$

مقدار $X/(X+Y)$ کسر مقدار x و $Y/(x+Y)$ برابر کسر مقدار y است. رابطه (۳-۴-۹) قانون اهرم معکوس است که معمولاً در کتابهای مواد برای محاسبه کسر مقدار فازها به کار می رود.*

□ حالت خاص سه فازي. لخمیهای سرب-قلع هنگامی که در 183°C یعنی در دمای اوتکتیک، به حال تعادل در آیند شامل سه فاز خواهند بود. در این حالت خاص محاسبه دقیق کسر مقادیر α و β و مایع موجود، میسر نیست. در 182°C می توان محاسبه کرد که آلیاژ $\text{Pb}-30\text{ Sn}$ شامل 70α و 30β است. همچنین محاسبات در 184°C وجود $1/2$ مایع (و 75α) را ثابت می کنند. در طی گرم کردن در دمای اوتکتیک، بین 182°C و 184°C ، تمام β و مقداری از α با هم ترکیب شده و مایع اوتکتیک را به وجود می آورند. در عمل، از 1000 گرم لحیم، 110 گرم α (یعنی $750\text{ g}-860\text{ g}$) و 140 گرم β مصرف می شود تا 250 گرم مایع اوتکتیک ($\text{Pb}-38.1\text{ Sn}$) حاصل شود. بنابراین با وجود سه فاز در 183°C فقط می توان گفت که مقدار α بین 860 تا 750 گرم، مقدار β بین 140 تا صفر گرم و مقدار مایع بین صفر تا 250 گرم است.**

مثال ۳-۴-۹-۱ مفرغ $90\text{ Cu}-10\text{ Sn}$ را در نظر بگیرید. الف) چه فازهایی در 300°C وجود دارد؟ ترکیب شیمیایی آنها چیست؟ کسر هر کدام چقدر است؟ ب) در 600°C چگونه؟ ج) در چه دمایی $1/3$ مایع وجود دارد؟ در چه دمایی $2/3$ مایع موجود است؟

حل: با استفاده از شکل ۳-۵-۹

$$\alpha: 92\text{ Cu}-7\text{ Sn} \quad \frac{37-10}{37-7} = 0.9 \quad (\text{الف})$$

$$\epsilon: 63\text{ Cu}-37\text{ Sn} \quad \frac{10-7}{37-7} = 0.1$$

$$\alpha: 90\text{ Cu}-10\text{ Sn} \quad 100 \quad (\text{ب})$$

* می توانید از این قانون اهرم برای محاسبه کسر مقدار فازها استفاده کنید، اگر ساده تر باشد از درون یابی طبق شکل ۳-۴-۹ می توان استفاده کرد. اگر از محور افقی برای درون یابی استفاده می کنید، رابطه (۳-۴-۹) به طور غیرمستقیم استفاده می شود. در هر صورت در نظر داشته باشید که ترکیب شیمیایی آلیاژ در «مرکز ثقل» بین ترکیب شیمیایی دو فاز مربوط به آن قرار دارد. این تکیه گاه اهرم است؛ فازی که مقدار آن بیشتر است روی بازوی کوتاه تر اهرم قرار دارد. ** این حالت خاص سه فاز برای سیستم دو جزئی مورد مشابیهی در سیستم یک جزئی دارد. مثلاً در مورد H_2O در 0°C (32°F)، محاسبه کسر مقدار یخ و کسر مقدار آب مایع امکانپذیر نیست.

مواد چند فاز: نمودارهای فازی ۴۲۷

ج) با استفاده از مقیاس میلی متری: $1/3 L$ در $900^\circ C$ و $2/3 L$ در $975^\circ C$ ▲

مثال ۲-۴-۹ برای ۷۵ گرم آلیاژ $Pb-30\% Sn$ در $182^\circ C$ موازنه مواد را براساس مقدار سرب انجام دهید و A ، مقدار α ، و B ، مقدار β ، را حساب کنید.

حل: با استفاده از معادله (۲-۴-۹) و محاسبه مقدار سرب در شکل ۳-۱-۹

$$0.808 A + 0.025 B = 0.70 (A + B)$$

$$A + B = 75 \text{ گرم}$$

با حل این دو رابطه

$$A = 64.7 \text{ g}, \quad B = 10.3 \text{ g}$$

$$\frac{A}{A+B} = 0.86 \quad \frac{B}{A+B} = 0.14$$

توضیح. اگر موازنه براساس قلع انجام گیرد

$$[0.192 A + 0.975 B = 0.30 (A + B)]$$

▲

همین نتیجه را خواهد داد.

مثال ۳-۴-۹ برای ۱۰ گرم از آلیاژ $Cu-60\% Ag$ (شکل ۲-۲-۹) مقدار β را به صورت تابعی از دما رسم کنید.

حل: قبلاً ترکیب شیمیایی فازها در مثال ۲-۳-۹ تعیین شد. از $890^\circ C$ به بالاتر

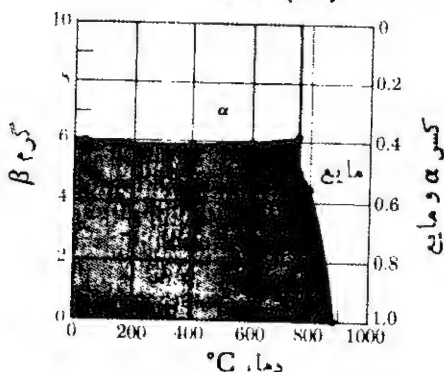
آلیاژ مایع و مقدار β صفر است. با درونیابی خواهیم داشت

$$0.45 (10 \text{ g}) = 4.5 \text{ g} \quad \text{در } 800^\circ C$$

$$0.50 (10) = 5.0 \quad 780^\circ +$$

$$0.615 (10) = 6.15 \quad 780^\circ -$$

$$0.60 (10) = 6.0 \quad 600^\circ$$



شکل ۲-۴-۹ مقدار فازها (۱۰ گرم آلیاژ $Cu-60\% Ag$) مقدار β به وسیله درونیابی تعیین شده است (مثال ۳-۴-۹).

$$۰.۵۹۵(۱۰) = ۵.۹۵$$

$$۴۰۰^{\circ}$$

$$۰.۶۶۰(۱۰) = ۶.۶۰$$

$$۲۰^{\circ}$$

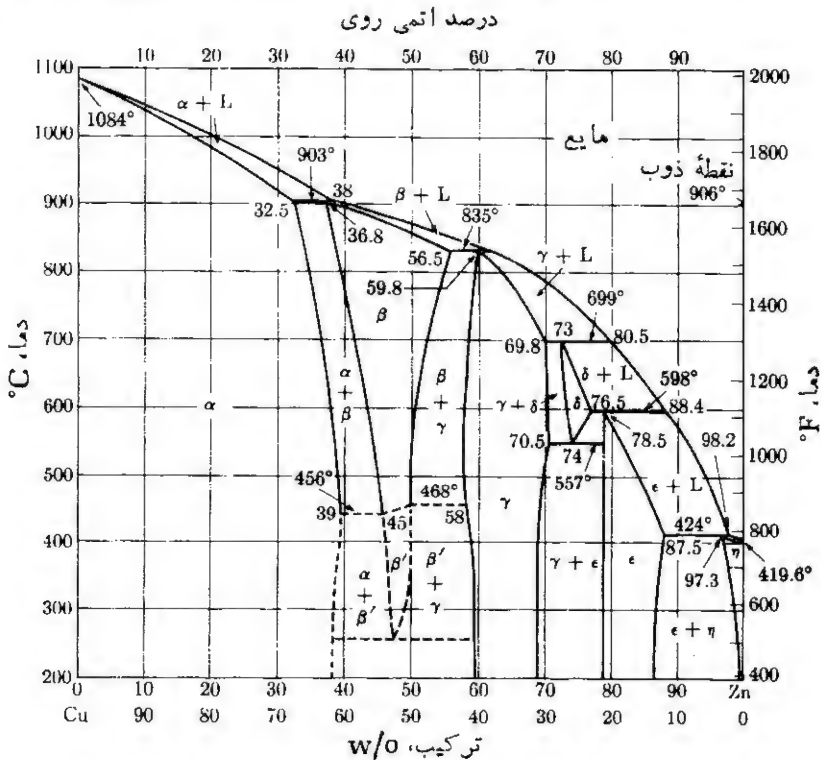
تابع آن به صورت ناحیه تیره سایه زده شده در شکل ۲-۴-۹ دیده می شود.

توضیح. مقادیر α و مایع (یا کسر مقدار آنها) را نیز می توان در شکل ۲-۴-۹ نشان داد زیرا جمع فازها در هر دمایی برابر ۱۰۰ گرم است این کار را با سایه زدن انجام داده ایم.

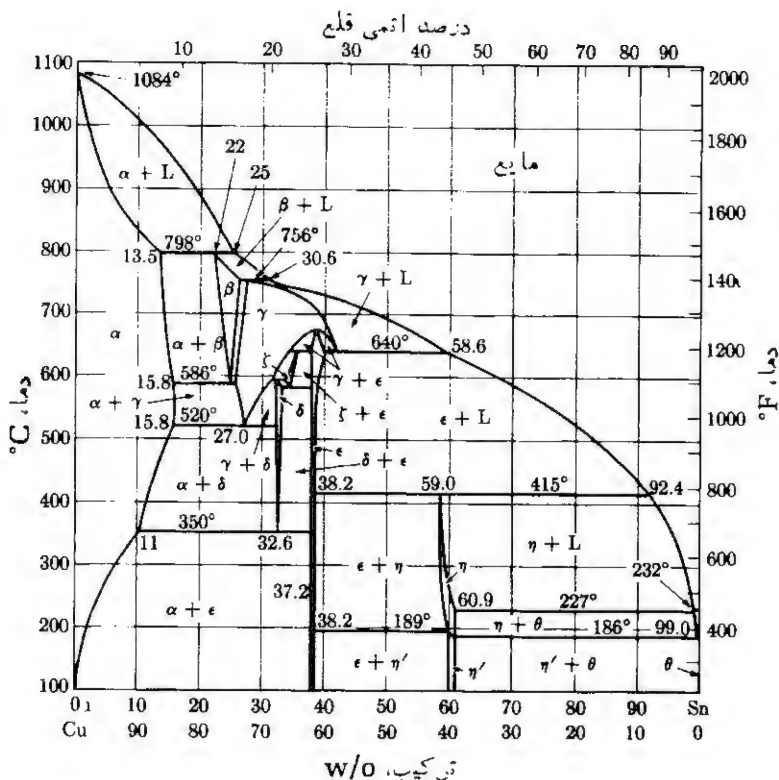
به ناپیوستگی منحنی در ۷۸۰°C (دمای اوتکتیک) توجه کنید، این حالت خاصی است که سه فاز به طور همزمان موجودند.

۵-۹ آلیاژهای تجارتي و سرامیکها

شایان ذکر است که بیشتر آلیاژهای تجارتي در قسمتهای ساده تر نمودارهای فازی واقع اند. مثلا ترکیب بیشتر آلیاژهای برنج در ناحیه تک فاز α در شکل ۱-۵-۹ واقع است. همچنین



شکل ۱-۵-۹ نمودار Cu-Zn.

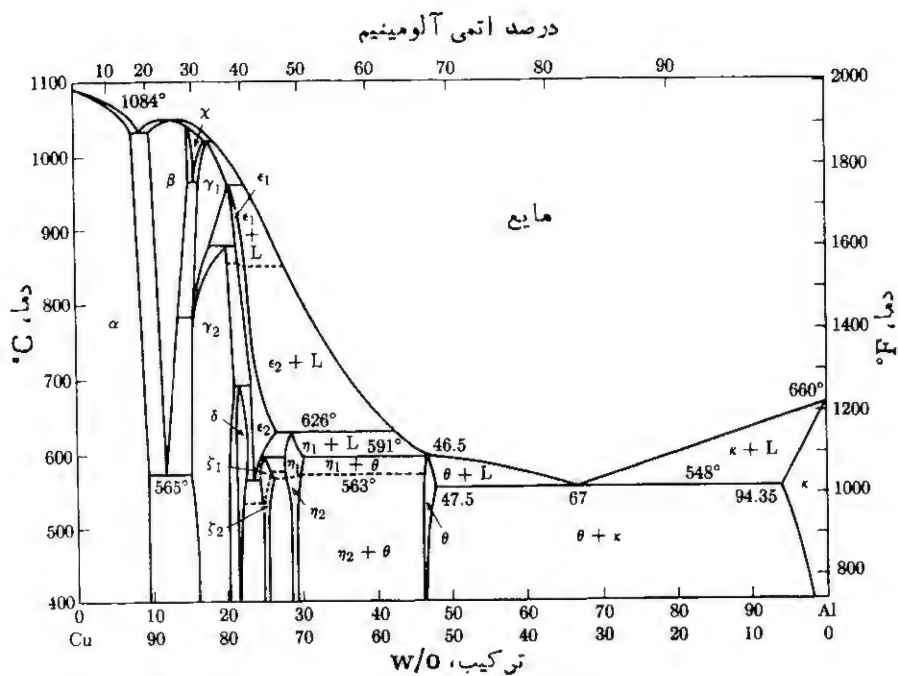


شکل ۹-۵-۲ نمودار Cu-Sn.

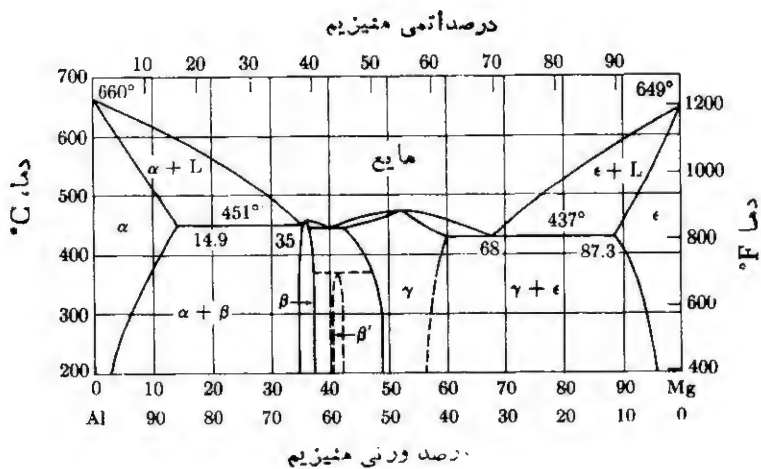
مفرغهای معمولی کمتر از ۱۰٪ قلع دارند. در سیستم Cu-Sn (شکل ۹-۵-۲) از نظر تجارتي به ناحیه‌هایی که ظاهر پیچیده‌تری دارد توجه کمتری می‌شود.* در فصل ۱۱ آلیاژهای مساند Cu-۵ Al، ۹۵ Al-۱۰ Mg، ۹۰ Al-۱۰ Mg، ۹۰ (شکلهای ۹-۵-۳ و ۹-۵-۴) را بررسی می‌کنیم زیرا هر کدام از آنها در دماهای بالا تک‌فازند. ولی در حین سرد شدن از منحنی حدحلالیت می‌گذرند. با کنترل کردن سرعت جدا شدن فاز دوم می‌توان استحکام آلیاژ را تا حدود زیادی افزایش داد و این در کارهای مهندسی بسیار با ارزش است (فصل ۱۱). سیستم Al-Si (شکل ۹-۵-۸) اساس خالص کردن نیمرساناها و مواد مربوط به آنها را از نظر تجارتي فراهم می‌سازد (مثال ۹-۵-۱).

در دو بخش بعد به دو دلیل به نمودار فازی Fe-Fe₃C خواهیم پرداخت. اولاً فولاد آلیاژی از آهن و کربن است که در هر جامعه صنعتی اهمیت بسیار دارد ثانیاً فولادها در

* با وجود ظاهر پیچیده، تمام نواحی یک‌فازی و یا دو‌فازی اند و بنابراین روشهایی که قبلاً گفته شد برای هر آلیاژی می‌توان فازها، ترکیب شیمیایی آنها و مقدار هر یک را محاسبه کرد.



شکل ۹-۵-۳ نمودار Al-Cu.

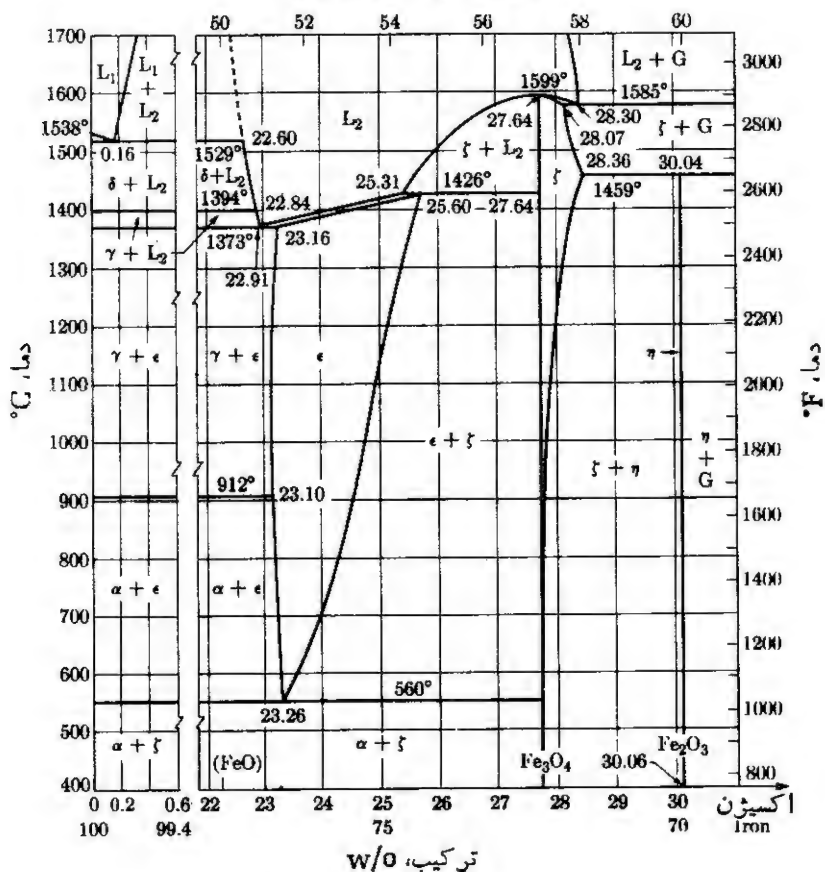


شکل ۹-۵-۴ نمودار Al-Mg.

روشهای عملیات گرمایی به عنوان الگو مطرح اند. تنها با آگاهی از نمودار فازی است که می توان عملیات گرمایی مناسب و میکروساختار مطلوب (و در نتیجه خواص مطلوب) را طراحی کرد.

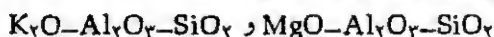
متخصصان سرامیک نیز مانند متخصصان متالورژی از نمودارهای فازی استفاده می کنند. با وجود این در این کتاب فقط پنج نمودار از مواد سرامیکی بررسی خواهد شد: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (شکل ۹-۲-۲)، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (شکل ۹-۲-۳)، Fe-O (شکل ۹-۵-۳)، FeO-MgO (شکل ۹-۵-۶)، و $\text{BaTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ (شکل ۹-۵-۷)*.

درصد اتمی اکسیژن، a/o

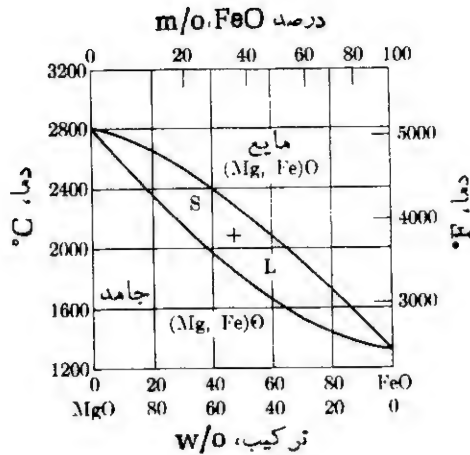


شکل ۹-۵-۵ نمودار Fe-O .

* محصولات سرامیکی حاوی سه جزء یا بیشترند. مثلاً

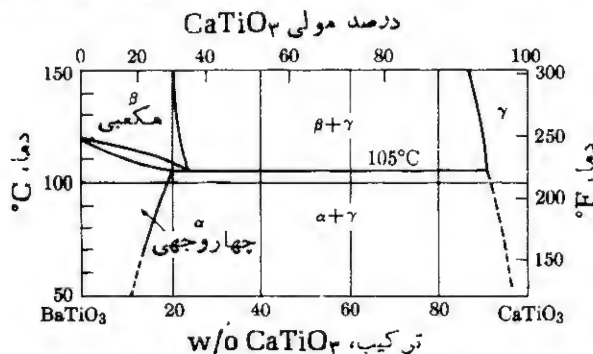


در چنینهایی که مصارف الکتریکی دارند. با وجود آنکه نمودارهای سه تایی فازها که پیچیده ترند، اهمیت زیادی دارند، در این کتاب آنها را بررسی نخواهیم کرد.



شکل ۹-۵-۶ نمودار $\text{MgO}-\text{FeO}$. با نمودار $\text{Cu}-\text{Ni}$ قابل مقایسه است. (شکل ۹-۲-۱) فازهای جامد و مایع هر دو به طور کامل حلالیت دارند ساختار محلول جامد $\text{FeO}-\text{MgO}$ در شکل ۴-۳-۱ نشان داده شده است.

اولی شامل مواد نسوز است. یعنی: اکسیدهای با نقطه ذوب بالا که دمای اوتکتیک آنها کمی کمتر از 2000°C است. دومی، $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ به سرامیکهایی که زمینه رسی دارند تعلق دارد خاکهای رس با کیفیت بهتر، پس از انجام فرایند روی آنها، دارای ترکیب تقریبی $60\text{SiO}_2-40\text{Al}_2\text{O}_3$ هستند. نمودار $\text{Fe}-\text{O}$ نشاندهنده گستره ناستوکیومتری Fe_{1-x}O (در شکل ۹-۵-۵) است که در فصول ۴ و ۵ و ۸ بررسی شد. نمودار $\text{FeO}-\text{MgO}$ (شکل ۹-۵-۶) مجموعه کامل محلولهای جامد را در زیر دمای خط انجماد نمایش می دهد. این نمودار با سیستم $\text{Cu}-\text{Ni}$ که در شکل ۹-۲-۱ نشان داده شد کاملاً قابل مقایسه است. نمودار فازی $\text{BaTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ (شکل ۹-۵-۷) نشان می دهد که



شکل ۹-۵-۷ نمودار $\text{BaTiO}_3-\text{CaTiO}_3$.

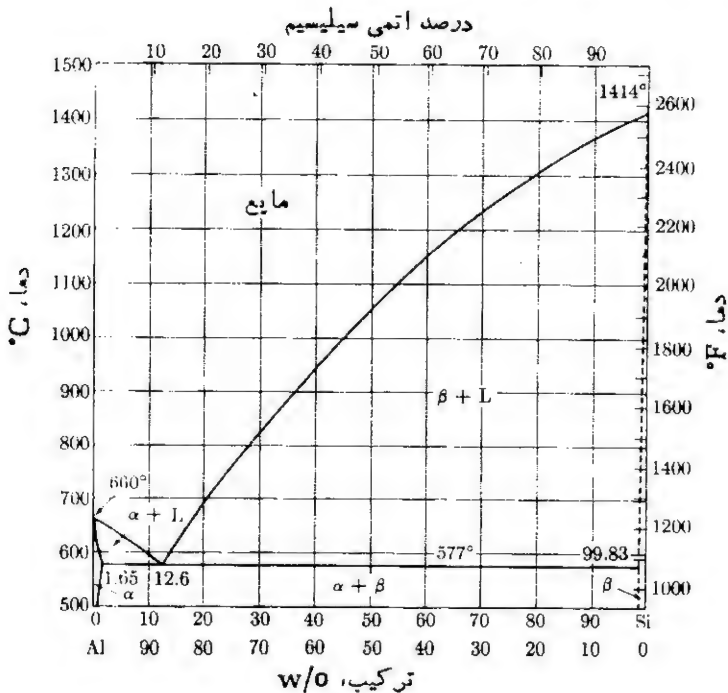
چگونه افزایش CaTiO_3 بر دمای تغییر راست وجهی BaTiO_3 (α) به ساختار مکعبی BaTiO_3 (β) اثر می گذارد. (به شکل ۸-۶-۲ مراجعه کنید.)

□ مثال ۹-۵-۱ در نمودار Al-Si (شکل ۸-۵-۹) و در دمای اوتکتیک (577°C)، فاز β فقط ۱۷ w/o آلومینیم را در خود حل می کند (یعنی $\text{Si } 99.83\%$ دارد). در نتیجه روی نمودار، حد حلالت Al در β بزرگتر از مقدار واقعی است. الف) اگر منحنی حلالت خطی فرض شود، ترکیب β بر حسب Al در 1350°C چیست؟

ب) آلیاژی که شامل 98 Al-Si است در 1350°C به تعادل می رسد و مایع را خارج می کنیم. چه کسری از Al خارج شده است؟
ج) جامد باقیمانده در 1450°C دوباره ذوب می شود درجه دمایی مجدداً انجماد شروع خواهد شد؟

د) ترکیب شیمیایی آن چیست؟

حل: الف) با فرض خطی بودن



شکل ۸-۵-۹ نمودار Al-Si .

$$\frac{0.17\%}{1414 - 577^\circ\text{C}} = \frac{C_B}{1414 - 1300^\circ\text{C}}$$

$$C_B = 0.023 \text{ w/o Al}$$

(ب) با استفاده از شکل ۸-۵-۹

$$C_L = 21 \text{ w/o Al. } 100 \text{ g از استفاده}$$

$$L = [100 \text{ g}] \left[\frac{2 - 0.023}{21 - 0.023} \right] = 94 \text{ g مایع}$$

$$\beta = 906 \text{ g}$$

$$\text{کسر آلومینیم خارج شده} = \frac{(94 \text{ g})(0.021)}{(100 \text{ g})(0.02)} = 0.99$$

(ج) انتهای بالایی منحنی ذوب در شکل ۸-۵-۹ تقریباً خطی است بنا بر این

$$\frac{21}{1414 - 1300^\circ\text{C}} = \frac{0.023}{1414 - T^\circ\text{C}}$$

$$T = 1414 - 0.124^\circ\text{C}$$

(د) با تکرار (الف)

$$\frac{0.17\%}{1414 - 577^\circ\text{C}} = \frac{C'_B}{0.124^\circ\text{C}}$$

$$C'_B = 0.00003 \text{ w/o Al}$$

توضیح. با چندبار تکرار این عمل متخصص متالورژی می تواند سیلیسیم را با کمتر از ۱/۱۵ اتم آلومینیم برای مواد نیمه رسانا که نیاز به درجه خلوص کنترل شده دارند، تولید کند. ▲

□ مثال ۸-۵-۹ آلیاژی (به وزن ۸۵ کیلوگرم) حاوی $93.3\text{Cu}-7\text{Ag}$ است. ابتدا ذوب و سپس تا دمای 950°C سرد شده است. اولین جامد (β) در 1050°C ظاهر شده و حاوی تقریباً $2\% \text{Ag}$ است. جامد جدا شده تقریباً $6\% \text{Ag}$ دارد؛ ولی سرد کردن به حدی سریع صورت گرفته که ترکیب جامد اولیه تغییر نکرده است. در نتیجه میانگین ترکیب β تقریباً $2\% \text{Ag}$ است، (نفوذ در مایع سریعتر است، بنابراین ترکیب آن در 950°C تقریباً $26\% \text{Ag}$ است.) (الف) چه مقدار مایع موجود است؟ (ب) مرحله دیگر

سرد کردن تا 800°C ، ادامه انجماد را به همین صورت (و بدون تغییر ترکیب جامد قبلی) میسر می‌سازد. در 800°C چه فازهایی وجود دارند؟ (ج) مقادیر نسبی آنها را معین کنید.

حل: الف)

$$\frac{(67 - \sim 4)}{(26 - \sim 4)} (58 \text{ kg}) = \sim 0.7 \text{ kg}$$

ب) مایع (تقریباً $65\% \text{ Ag}$ ؛ جامد ($2\% \text{ Ag}$ تا 8%)

ج) میانگین ترکیب β ثانویه تقریباً $7\% \text{ Ag}$ است

$$\left[\frac{26 - \sim 7}{65 - \sim 7} \right] (0.7 \text{ kg}) = \sim 0.2 \text{ kg مایع}$$

بنابراین

$$\sim 56 \text{ kg } \beta$$

توضیح. این نمونه‌ای است از جدایش (شکل ۱۱-۲-۱ را ببینید). در هر فرایند انجماد این امری عادی است مگر آنکه برای نفوذ فرصتی داده شود. البته سرد کردن به جای دو مرحله‌ای که نشان دادیم به صورت پیوسته صورت می‌گیرد. ▲

۹-۶ فازهای سیستم آهن-کربن

فولادها که آلیاژهای اصلی آهن و کربن‌اند اکثر واکنشها و میکروساختارهای متداول برای اصلاح خواص مواد را از خود بروز می‌دهند. همچنین آلیاژهای آهن و کربن به عنوان مهمترین مواد مهندسی سازه به کار می‌روند.

فولادهای متنوعی که تولید شده‌اند نشان‌دهنده قابلیت تغییر فولادها به عنوان مواد مهندسی‌اند. از یک طرف فولادهای بسیار نرمی که برای کاربردهای کشش عمیق تولید می‌شوند و برای ساخت قطعاتی چون سپراتومبیل و صفحه‌اجاق استفاده می‌شوند و از طرف دیگر فولادهای فوق‌العاده سخت و چقرمه برای تیغه‌های بولدوزر و دنده‌ها به کار می‌روند. بعضی فولادها باید مقاومت بسیار زیادی در برابر خوردگی داشته باشند. فولادهایی که در مبدل‌های الکتریکی به کار می‌روند، باید مشخصات مغناطیسی خاصی داشته باشند، به طوری که در هرثانیه چندین بار و با اتلاف انرژی کم، مغناطیسی و غیرمغناطیسی شوند و برخی دیگر باید کاملاً غیرمغناطیسی باشند تا در مواردی چون ساعت‌های مچی و مین‌یاب به کار آیند. برای توضیح هر یک از خواص فوق می‌توان از نمودارهای فازی استفاده کرد. ساختار بلوری آهن خالص قبل از ذوب شدن، دوبار تغییر می‌کند. همان‌طور که در بخش ۳-۴ شرح داده شد، در 912°C (1673°F) ساختار آهن از bcc به fcc و در 1394°C (2540°F) دوباره به bcc تبدیل می‌شود و تا هنگام ذوب در 1538°C (2800°F) ساختار bcc باقی می‌ماند.

فریت یا آهن α . ساختار آهن خالص در دمای اتاق، آهن α یا فریت نامیده می‌شود. فریت با خلوص تجارتي کاملاً نرم و انعطاف پذیر است. استحکام کششی آن از ۳۱۰ MPa کمتر است. فریت در دمای پایینتر از 770°C (1418°F)، ماده‌ای فرومغناطیسی است. چگالی فریت 7788 Mg/m^3 (7788 g/cm^3) است.

از آنجا که ساختار فریت مکعبی مرکزدار است، فضاهای بین اتمی آن کوچک و به‌طور مشخصی بخت‌اند و حتی نمی‌توانند اتم کروی و کوچک کربن را به راحتی در خود جای دهند. در نتیجه، حلالیت کربن در فریت بسیار کم است (کمتر از ۱ کربن در ۱۰۰۰ اتم آهن). اتم کربن کوچکتر از آن است که محلول جامد جانشینی تشکیل دهد و بزرگتر از آن است که محلول جامد بین نشینی خارجی به وجود آورد (بخش ۴-۲).

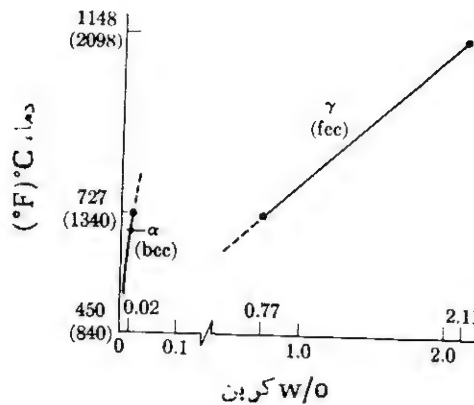
استنیت یا آهن γ . ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار آهن استنیت یا آهن γ نام دارد و حالت پایدار آهن خالص بین 912°C و 1394°C است. مقایسه مستقیم خواص مکانیکی استنیت و فریت آسان نیست زیرا این مقایسه باید در دماهای مختلف انجام گیرد. به‌طور کلی در دماهایی که استنیت پایدار است، فلز نرم و انعطاف پذیر و بنابراین برای فرایندهای تولید مناسب است. لذا بیشتر عملیات پتک کاری و نورد در 1100°C (2000°F) یا بالاتر که در آن آهن ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار دارد، انجام می‌شود. استنیت در هیچ دمای فرومغناطیسی نیست.

فضاهای بین اتمی ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار از فضاهای بین اتمی فریت بزرگتر است. حتی در FCC نیز بزرگی حفره‌ها به قدری است که اتمهای کربن به زحمت در مکانهای بین نشینی جا می‌گیرند و تجمع اتمها در مکانهای بین نشینی در ساختار آهن کرنش به وجود می‌آورد. در نتیجه تمام حفره‌ها نمی‌توانند در یک زمان پر شوند. (تقریباً ۶٪ در 912°C) و بیشینه حلالیت فقط ۲٫۱۱٪ (یا ۹ a/o) کربن است (شکل ۹-۶). بنا به تعریف، فولادها کمتر از ۱٫۲٪ کربن دارند و بنابراین تمام این مقدار در دماهای بالا در استنیت حل می‌شود.

آهن δ . بالاتر از 1394°C (2540°F) استنیت پایدار نیست بنابراین ساختار بلوری مجدداً به bcc تبدیل می‌شود و آهن δ نام دارد. آهن دلتا مانند آهن آلفا فقط گستره دمای آن فرق می‌کند. بنابراین معمولاً فریت δ نامیده می‌شود. حلالیت کربن در فریت δ کم است ولی به دلیل بالاتر بودن دما به مراتب از حلالیت آن در فریت آلفا زیادتر است.

آهن - کاربید. در آلیاژهای آهن - کربن اگر کربن از حد حلالیت بیشتر باشد فاز دیگری تشکیل می‌شود که معمولاً آهن کاربید (سمانتیت) است. * آهن کاربید دارای ترکیب شیمیایی

* گرافیت فاز کربن اضافی در بیشتر چدن‌هاست که در آنها مقدار سیلیسیم و کربن بالاست (بخش ۱۳-۱).



شکل ۹-۶-۱ حلالیت کربن در آهن. در 20°C مقدار قابل اغماضی کربن در فریت (α) حل می‌شود. در 727°C این حلالیت فقط به 0.02 w/o می‌رسد. حلالیت کربن در استنیت (γ) از 0.77 w/o در 727°C تا 2.11 w/o در 1148°C افزایش می‌یابد.

Fe_3C است. این بدان معنی نیست که آهن کاربید را مولکولهای Fe_3C تشکیل می‌دهد، بلکه واقعیت این است که اتمهای آهن و کربن در ساختار بلوری کاربید. با نسبت سه به یک وجود دارند. سلول واحد Fe_3C مکعب مستطیل است و در هر سلول ۱۲ اتم آهن و ۴ اتم کربن قرار دارد، بنابراین درصد وزنی کربن در آن ۷٪ خواهد بود. چگالی آن 7.6 Mg/m^3 (7.6 g/cm^3) است.

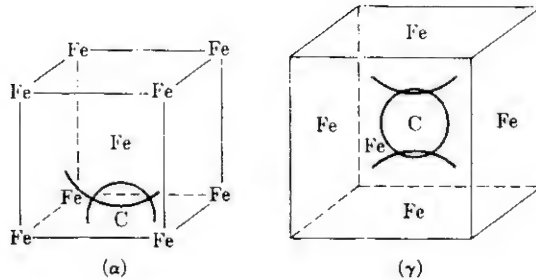
سمانتیت در مقایسه با استنیت و فریت بسیار سخت است و وجود آهن کاربید با فریت استحکام فولاد را تساحد زیادی افزایش می‌دهد (بخش ۱۰-۳). با وجود این، چون آهن کاربید انعطاف پذیر نیست، نمی‌تواند تمرکز تنش را تحمل کند در نتیجه (در مقایسه با مواد سرامیکی غیر انعطاف پذیر (بخش ۸-۷)) به تنهایی نسبتاً ضعیف است.

مثال ۹-۶-۱ در آهن bcc، اتمهای کربن در مکانهای $1/2$ و $1/2$ قرار می‌گیرند. الف) با توجه به اینکه $r_{\text{C}} = 0.077\text{ nm}$ و $R_{\alpha} = 0.124\text{ nm}$ است، نزدیکترین اتمهای آهن چقدر باید جابه‌جا شوند تا کربن بین آنها قرار گیرد؟

ب) در آهن fcc اتم کربن در $1/2$ و $1/2$ قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه شعاع آهن γ $R_{\gamma} = 0.127\text{ nm}$ است (جدول ۲-۵-۱)، اتمهای آهن چقدر جابه‌جا می‌شوند؟

حل: الف) با مراجعه به شکل ۹-۶-۲ (α)، نزدیکترین اتمهای آهن در $1/2$ و $1/2$ قرار دارند.

$$a = 4(0.124\text{ nm})/\sqrt{3} = 0.286\text{ nm}$$



شکل ۹-۶-۲ مثال ۹-۶-۱ را ببینید. با وجود آنکه ضریب فشردگی اتمی fcc بیش از bcc است (۷۴ در مقابل ۶۸) محل‌های بین‌نشینی بزرگتری دارد (و تعداد کمتر) در نتیجه اتم‌های کربن در آهن γ کمتر از آهن α در فشار خواهند بود. این امر سبب حلالیت بیشتری در ساختار fcc می‌شود.

$$\Delta = (0.124 \text{ nm} + 0.077 \text{ nm}) - (0.286 \text{ nm}) / 2 = 0.06 \text{ nm}$$

این امر فاصله بین مراکز اتم‌های آهن را ۴۰٪ $(0.06) / 0.286$ افزایش می‌دهد. (ب) مطابق شکل ۹-۶-۲ (γ)، نزدیکترین اتم‌های آهن در مکان‌های fcc هستند.

$$a = 4(0.127 \text{ nm}) / \sqrt{2} = 0.359 \text{ nm}$$

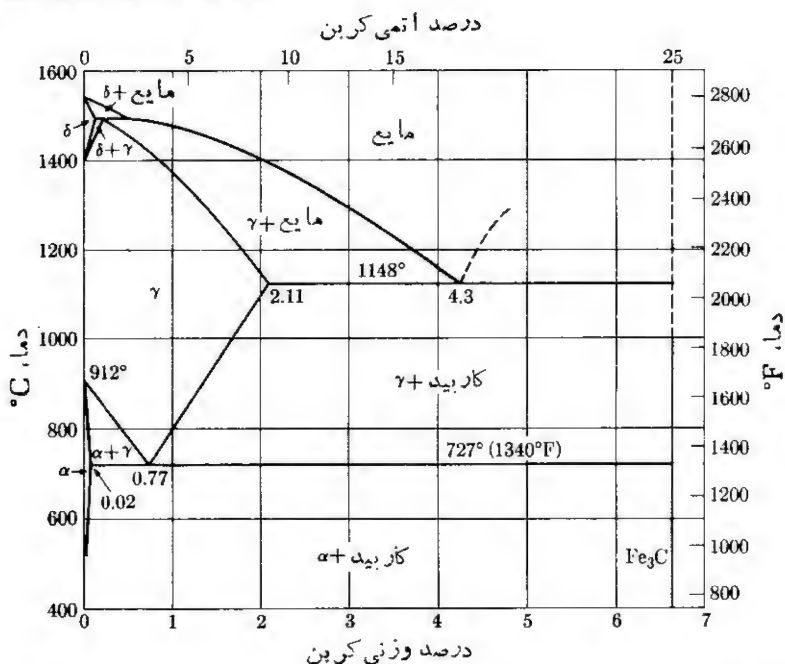
$$\Delta = (0.127 \text{ nm} + 0.077 \text{ nm}) - (0.359 \text{ nm}) / 2 = 0.025 \text{ nm}$$

این امر فاصله بین مراکز اتم‌های آهن را ۱۴٪ $(0.025) / (0.359)$ افزایش می‌دهد.

توضیح. گرچه ضریب فشردگی اتمی در آهن bcc کمتر از fcc است حفره‌های موجود در آن کوچکترند و وجود کربن جابه‌جایی بیشتری را موجب می‌شود. [ضریب فشردگی اتمی در آهن bcc کم است (۶۸) زیرا ۶ مکان بین‌نشینی شش‌گانه (مربوط به $1/2, 1/2, 1/2, 1/2, 0, 0, 0, 1/2$) و دوازده مکان بین‌نشینی چهارگانه (مربوط به $0, 1/2, 1/2, 1/2, 1/2, 0, 0, 0$) دارد. آهن fcc ($PF = 0.74$) در هر سلول واحد bcc فقط چهار مکان بین‌نشینی شش‌گانه و هشت مکان بین‌نشینی چهارگانه دارد (شکل ۸-۲-۲).]

۹-۷ نمودار فاز Fe-Fe₃C

شکل ۹-۷-۱ نمودار فاز آهن و آهن‌کاربید (Fe₃C) را نشان می‌دهد. عملیات گرمایی بیشتر فولادها بر اساس چنین نموداری انجام می‌گیرد. بدون در نظر گرفتن ناحیه ۱-۵٪ کربن، شکل ۹-۷-۱ شباهت زیادی به نمودارهای



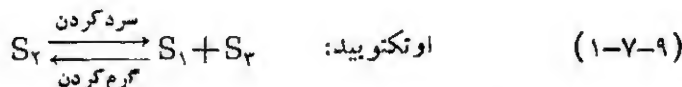
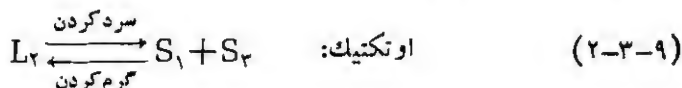
شکل ۹-۷-۱ نمودار فازی Fe-Fe₃C. قسمت چپ و پایین نمودار در عملیات گرمایی فولاد بسیار مورد توجه است.

فازی قبلی دارد. ترکیب اوتکتیک در ۴۳ w/o (یا ۱۷a/o) کربن و دمای اوتکتیک در ۱۱۴۸°C (۲۱۰۰°F) واقع است. ترکیب چدن، که معمولاً ۲ تا ۲۵٪ کربن دارند (بخش ۱۳-۱)، مبتنی بر ناحیه اوتکتیک است. چدن نقطه ذوب نسبتاً پایینی دارند و به آسانی تغییر شکل می‌یابند و ریخته‌گری می‌شوند.

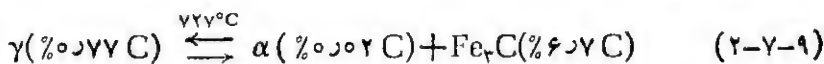
γ غنی از آن می‌تواند تا ۲.۱ w/o (۹a/o) کربن را در خود حل کند. همان‌طور که در بخش قبل بحث شد این اتمهای کربن در مکانهای بین‌نشینی آهن fcc قرار می‌گیرند. این فاز محلول جامد اساس وجود فولادهاست. از آنجا که فولادها کمتر از ۲.۱٪ کربن دارند و دماهای پتکاری و سایر دماهای کار گرم که در ناحیه ۱۱۰۰ تا ۱۲۵۰°C (۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰°F) انجام می‌گیرد، فاز می‌تواند تک‌فاز باشد که مزیتی برای تولید است.

در ناحیه غنی از آهن (۹۹٪ Fe < ۱٪ C) نمودار Fe-Fe₃C با نمودارهای قبلی فرق دارد و این اختلاف از چند شکلی آهن و وجود فазهای bcc و fcc ناشی می‌شود. چون در این کتاب ذوب و انجماد فولاد مدنظر نیست، درباره صورت مختلف ناحیه کم کربن در بالاتر از ۱۴۰۰°C بحث نمی‌شود، در عوض به حالت‌های این نمودار در گستره دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰°C (۱۳۰۰°F تا ۱۶۵۰°F) و گستره صفر تا ۱٪ کربن بسیار توجه خواهد شد زیرا در این نواحی است که می‌توان میکروساختارهایی که برای خواص مورد نظر در فولاد لازم‌اند را، به وجود آورد.

واکنش اوتکتوئید. در شکل ۹-۷-۲ اضافه کردن نمک معمولی به آب (شکل ۹-۱-۲) با اضافه کردن کربن به استنیت مقایسه شده است و مشاهده می شود که در هر دو صورت، افزودن جسم حل شدنی، گستره دمای پایداری محلول را پایین می آورد. این دو مثال فقط از یک نظر با هم فرق دارند: بالاتر از دمای اوتکتیک، در سیستم یخ-نمک محلول مایع و در سیستم آهن-کربن محلول جامد وجود دارد به طوری که در حین سرد شدن واکنش اوتکتیک واقعی به وجود نمی آید. هر چند به دلیل شباهت این واکنش به واکنش اوتکتیک، آن را اوتکتوئید (یعنی شبه اوتکتیک) می نامند

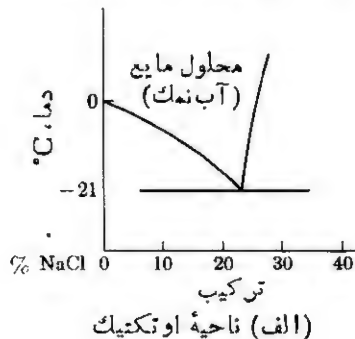
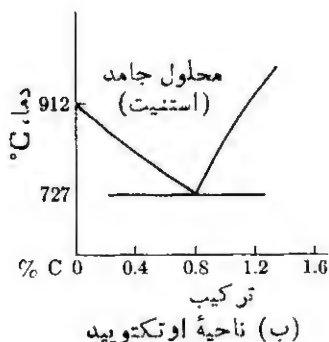


دمای اوتکتوئید برای آلیاژهای آهن-کربن 727°C (1340°F) است و ترکیب اوتکتوئید مربوط به آن در حدود ۰٫۸٪ کربن دارد. واکنش اوتکتوئید و یسره آلیاژهای Fe-C به این صورت است

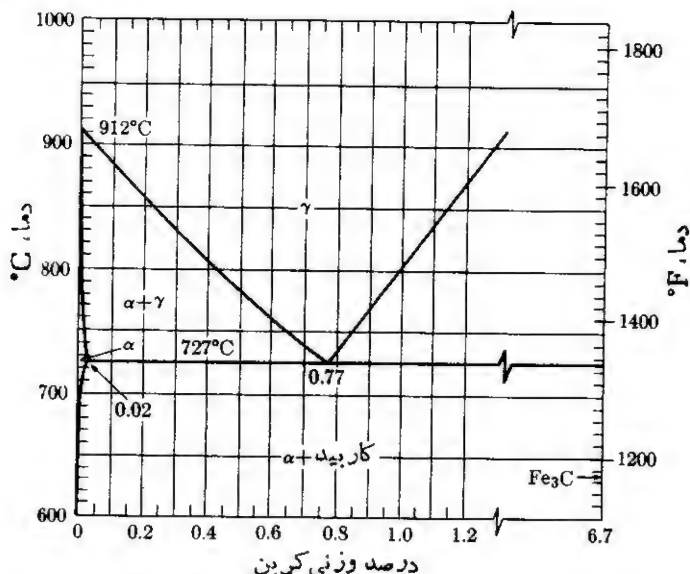


شکل ۹-۷-۳ ناحیه اوتکتوئید را با جزئیات بیشتری نسبت به شکل ۹-۷-۱ نشان می دهد.

مثال ۹-۷-۱ فولادی با ترکیب اوتکتوئید (تقریباً ۰٫۸٪ کربن) پس از گرم کردن تا 800°C به آهستگی تا دمای اوتکتوئید (727°C) سرد می شود. کاربید تشکیل شده در ۱۰۰ گرم از این فولاد را حساب کنید.



شکل ۹-۷-۲ نواحی اوتکتیک و شبه اوتکتیک (اوتکتوئید) در نمودارهای فازی.



شکل ۳-۷-۹ ناحیهٔ اوتکتوئید در نمودار تعادلی Fe-Fe₃C. (به شکل ۱-۷-۹ رجوع کنید). فولادهایی که تقریباً ۰.۸٪ کربن دارند معمولاً فولاد اوتکتوئید نامیده می‌شوند. فولادهای هیپراوتکتوئید بیشتر از این مقدار و فولادهای هیپواوتکتوئید کمتر از این مقدار کربن دارند.

حل: در 726°C (1339°F): (و ۸۸ گرم α)

$$\text{گرم کربید} = \frac{0.08 - 0.02}{0.77 - 0.02} (100 \text{ گرم}) = 12 \text{ گرم}$$

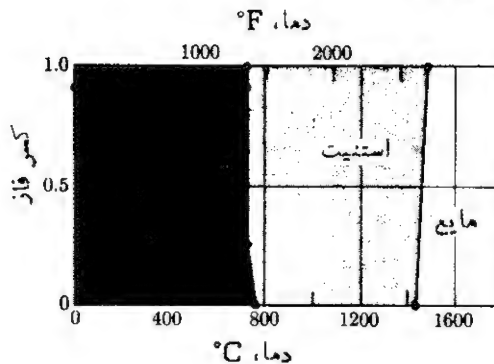
توضیح. با وجود آنکه اندازه‌گیریهای دقیقتر نشان داده‌اند که ترکیب اوتکتوئید ۷۷٪ کربن است، ولی معمولاً ۰.۸٪ به کار می‌رود. ▲

مثال ۲-۷-۹ برای آلیاژ ۰.۶٪ کربن-۹۹.۴٪ آهن، کسر فریت، استنیت و کربید را به صورت تابعی از دما رسم کنید.

$$\text{فریت} = \frac{0.77 - 0.60}{0.77 - 0.02} = 0.23 \quad \text{حل: در } 728^{\circ}\text{C} (1342^{\circ}\text{F})$$

$$\text{فریت} = \frac{0.77 - 0.60}{0.77 - 0.02} = 0.91 \quad \text{در } 726^{\circ}\text{C} (1339^{\circ}\text{F})$$

▲ برای فازهای دیگر و در دماهای دیگر نتایج محاسبه در شکل ۳-۷-۹ دیده می‌شود.



شکل ۹-۷-۴ کسرفازها (در فولاد $0.6\%C-Fe-99.4\%$). (مثال ۹-۷-۲ را ببینید). در $728^{\circ}C$ ($1342^{\circ}F$) تقریباً $3/4$ این فولاد استنیت است. از آنجا که در این دما γ ترکیب اوتکتوئید را دارد، در بخش بعد خواهیم دید که چنین فولادی حدود 75% پرلیت (و $1/4$ فریت پرو اوتکتوئید) دارد.

۸-۹ تجزیه استنیت

واکنش اوتکتوئید آهن-کربن در حین سرد شدن موجب تشکیل فریت، α ، و کاربید \bar{C} می‌شود که به‌طور همزمان از تجزیه استنیت γ به‌وجود می‌آیند

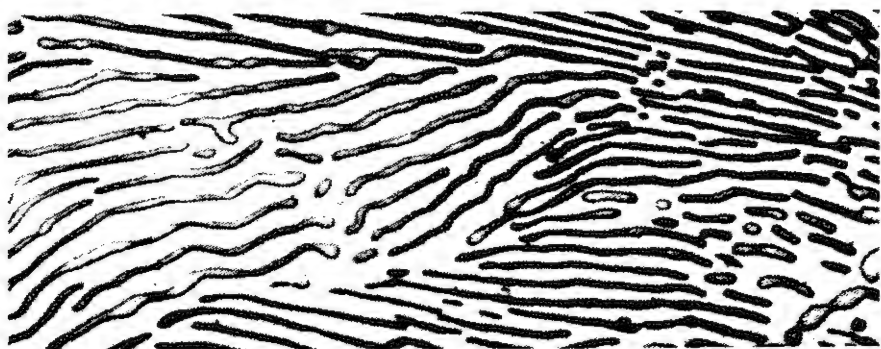


در مخلوط حاصل حدود 12% کاربید و بیش از 88% فریت وجود دارد. به‌دلیل اینکه این کاربید و فریت همزمان تشکیل می‌شوند، کاملاً مخلوط شده‌اند. از مشخصات این مخلوط لایه‌ای بودن است یعنی از لایه‌های متناوب فریت و کاربید ترکیب شده است (شکل ۹-۸-۱). میکروساختار حاصل پرلیت نامیده می‌شود که در تکنولوژی آهن و فولاد بسیار مهم است زیرا با عملیات گرمایی مناسب در هر نوع فولادی می‌توان آن را به‌وجود آورد.

پرلیت مخلوط خاصی از دو فاز است که از تبدیل استنیت با ترکیب اوتکتوئید، به فریت و کاربید حاصل می‌شود. این تشخیص مهم است، زیرا مخلوط‌های دیگری از فریت و کاربید برائش واکنش‌های دیگری تشکیل می‌شوند که میکروساختار آنها لایه‌ای نیست [شکل‌های ۹-۲-۲-۱۰ (ب) و ۹-۸-۱ را با هم مقایسه کنید] و در نتیجه خواص این مخلوط‌ها با خواص پرلیت فرق دارد (بخش ۱۰-۳ را ببینید).

از آنجا که پرلیت از استنیت با ترکیب اوتکتوئیدی به‌وجود می‌آید مقدار پرلیت موجود برابر مقدار استنیت اوتکتوئیدی است که تبدیل شده است (شکل ۹-۸-۲). این مقدار

* از علامت \bar{C} برای نشان دادن کاربید استفاده شده است که تا با علامت C ، نشان‌دهنده عنصر کربن، اشتباه نشود. برای محاسبات از 0.8% کربن به عنوان مقدار تقریبی ترکیب اوتکتوئید استفاده شده است.



شکل ۹-۸-۱ پرلیت ($\times 2500$). این میکروساختار که مخلوطی لایه‌ای از فریت (زمینه روشن) و کاربید (نواحی تاریک) است، از استنیت با ترکیب اوتکتوئید به وجود آمده است، لذا این پرلیت همان مقدار و ترکیب اوتکتوئید را داراست.

را می‌توان با اندازه‌گیری مقدار γ درست بالای دمای اوتکتوئید، محاسبه کرد. مثالهای ۹-۸-۱ و ۹-۸-۲ این مطلب را نشان می‌دهند.

مثال ۹-۸-۱ مقدار پرلیت را در آلیاژ $0.5\% \text{C} - 99.5\% \text{Fe}$ که از 870°C (1600°F) به آهستگی سرد شده است تعیین کنید (مبنا: 100°C گرم آلیاژ).

حل: از 870°C تا 727°C : 100°C گرم استنیت با $0.5\% \text{C}$ کربن وجود دارد. از 727°C تا 727°C (+): فریت از استنیت جدا شده و مقدار کربن استنیت به تقریباً $0.8\% \text{C}$ افزایش می‌یابد.

در 727°C (+): ترکیب فریت = $0.8\% \text{C}$

مقدار فریت = 38°C گرم

ترکیب استنیت = تقریباً $0.8\% \text{C}$

مقدار استنیت = 62°C گرم

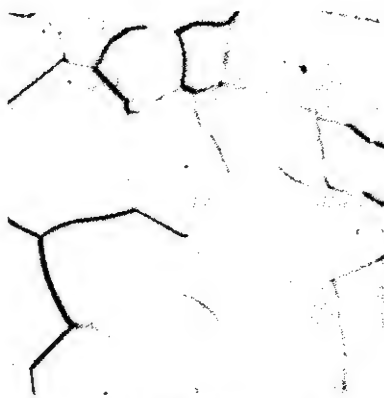
در 727°C (-): مقدار پرلیت 62°C گرم (یعنی برابر مقدار استنیت اوتکتوئید و با همان ترکیب است).

توضیح. محاسبات بالا بر این فرض استوار است که برای رسیدن به تعادل زمان کافی وجود داشته باشد. فریتی که در بالاتر از 727°C (یعنی قبل از واکنش اوتکتوئید) تشکیل شده است فریت پرو اوتکتوئید نام دارد و آن قسمت از فریت که جزء پرلیت است و از ترکیب اوتکتوئید حاصل شده فریت اوتکتوئید نامیده می‌شود (شکل ۹-۸-۲ (ب) - (د) را ببینید).

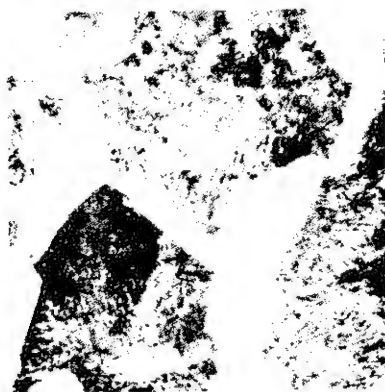
مثال ۹-۸-۲ از نتایج مثال بالا استفاده کنید و مقدار فریت و کاربید موجود در آلیاژ ذکر شده را الف) در 725°C (-) و ب) در دمای اتاق حساب کنید. مبنا: 100°C گرم آلیاژ



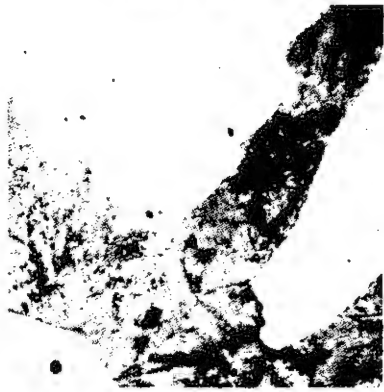
(ب) % 0.20 C



(الف) % 0C



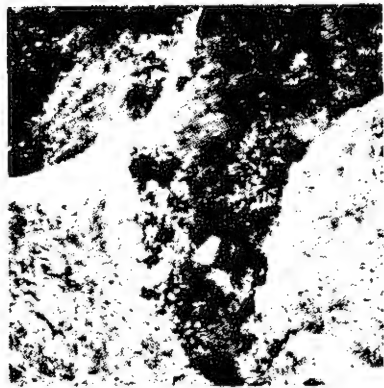
(د) % 0.5 C



(ج) % 0.35 C



(ه) % 1.2 C



(ا) % 0.7 C

شکل ۹-۸-۲ آلیاژهای «آهن-کربن» تا پیکاری شده ($\times 500$). در مراحل (الف) تا (و) مقدار کربن افزایش می‌یابد و بنا بر این کاهشی در مقدار فریت پرو اوتکتوئید (نواحی سفید) که قبل از واکنش اوتکتوئید از استنیت جدا می‌شود، وجود دارد. نواحی خاکستری پرلیت است یعنی مخلوط لایه‌ای فریت اوتکتوئید و کاربید. در (و) زمینه بین دانه‌های اولیه استنیت، کاربید پرو اوتکتوئید است، زیرا مقدار کربن آن فولاد از $0.8\% \text{ W/O}$ بیشتر است.

مواد چندفاز: نمودارهای فازی ۴۴۵

(از برخی داده‌های مثال ۹-۸-۱ استفاده شده است).

حل: الف) در $(-) 727^{\circ}\text{C}$ و در صورتی که اوتکتوئید تقریباً ۸۰٪ کربن داشته باشد

$$\frac{\text{گرم کربید}}{100 \text{ گرم فولاد}} = 72 \frac{0.08 - 0.002}{0.67 - 0.002} = 72 \quad \text{مقدار کربید: } (62)$$

فریت تشکیل شده با پرلیت (اوتکتوئید) $548 = 72 - 62$: مقدار فریت فریتی که قبل از پرلیت تشکیل شده است (پرو اوتکتوئید) ۳۸ گرم مقدار کل فریت در ۱۰۰ گرم فولاد ۹۲۸ گرم شق دیگر

$$\frac{\text{گرم کربید}}{100 \text{ گرم فولاد}} = 72 \frac{0.05 - 0.002}{0.67 - 0.002} = 72 \quad \text{مقدار کربید}$$

$$\frac{\text{گرم فریت}}{100 \text{ گرم فولاد}} = 928 \frac{0.67 - 0.05}{0.67 - 0.002} = 928 \quad \text{مقدار فریت}$$

ب) در دمای اتاق (حلالیت کربن در فرسیت در دمای اتاق را برای این محاسبات می‌توان صفر در نظر گرفت)

$$\frac{\text{گرم کربید}}{100 \text{ گرم فولاد}} = 75 \frac{0.05 - 0}{0.67 - 0} = 75$$

$$\frac{\text{گرم فریت}}{100 \text{ گرم فولاد}} = 925 \frac{0.67 - 0.05}{0.67 - 0} = 925$$

توضیح. از نقطه اوتکتوئید به پایین حلالیت کربن در فریت تقریباً به صفر می‌رسد به همین دلیل، کربید اضافی از فریت جدا می‌شود و رسوب می‌کند. ولی این کربید اضافی متعلق به پرلیت نیست (هریک از این محاسبات با فرض رسیدن به تعادل انجام می‌گیرد).

۹-۹ فولادهای ساده و کم آلیاژ

گروه عمده‌ای از فولادها چنان طرح می‌شوند که عملیات گرمایی آنها در ناحیه γ انجام گیرد (استنیتی کردن) و سپس با سرد کردن، استنیت موجود مستقیماً (یا به‌طور غیرمستقیم) به فریت و کربید تجزیه شود $(\alpha + \text{C})$. اگر فولادی اساساً دارای آهن و کربن باشد،

* به‌علاوه تقریباً ۰.۵٪ Mn به‌منظور انجام فرایندها.

فولاد ساده نامیده می‌شود. هر گاه چنین فولادی کمتر از پنج درصد عناصر آلیاژی از قبیل نیکل، کرم، مولیبدنیم، منگنز و سیلیسیم داشته باشد، فولاد کم‌آلیاژ نامیده می‌شود. عناصر آلیاژی اساساً به این منظور اضافه می‌شوند که سرعت تجزیه استنیت به $(\alpha + \bar{C})$ را حین عملیات گرمایی کاهش دهند، و همان‌طور که در فصل ۱۵ خواهیم دید نتیجه این عمل تولید فولادهای بسیار سخت است.

فریت پرواوتکتوئید [شکلهای ۹-۸-۲ (ب) تا (ه)] بسیار راحت‌تر از فریتی که در پرلیت است تغییر شکل می‌یابد زیرا مقدار آن بیشتر است و مانند فریت اوتکتوئید توسط لایه‌های سخت‌تر و صلب‌تر کاربید تقویت نشده است. فولادهایی که در میکروساختار آنها نواحی فریت جداگانه وجود دارد (و مقدار کربن آنها کمتر از ترکیب اوتکتوئید است)، هیپوآتکتوئید نامیده می‌شوند. به همین ترتیب هر گاه فولاد اوتکتوئید به آهستگی سرد شود، بیشتر شامل پرلیت خواهد بود و فولادی که مقدار کربن آن بیشتر از ترکیب اوتکتوئید است و کاربید پرواوتکتوئید دارد، فولادهیپرآتکتوئید نام دارد [شکل ۹-۸-۲ (و)]. فولادهای «هیپوآتکتوئید» متداولتر از فولادهای هیپرآتکتوئیدند.

نامگذاری فولادها. اهمیت کربن در فولاد موجب شده است که انواع فولاد را برحسب مقدار کربن آنها مشخص کنند و برای این کار عددی «چهار رقمی» به کار می‌رود که دو رقم سمت راست آن صدها بر درصد کربن را نشان می‌دهد (جدول ۹-۹-۱). مثلاً فولاد ۱۰۴۵، ۴۵ درصد (بعلاوه یسارهای مقدار کمی) کربن دارد. دو رقم سمت چپ نمایانگر عناصر آلیاژی اضافه شده به آهن و کربن است، این طبقه‌بندی $(X \times 10)$ برای فولادهای ساده‌ای که مقدار اندکی عناصر آلیاژی دارند به کار رفته است.

این علامت‌گذاریها استاندارد است و توسط انجمن آهن و فولاد آمریکا (AISI) و جامعه مهندسان صنایع اتومبیل‌سازی و حمل‌ونقل آمریکا (SAE) هر دو پذیرفته شده است. بسیاری از فولادهای تجارنی به دلایل متنوع بودن عناصر آلیاژی، در این طبقه‌بندی گنجانیده نشده‌اند. ولی معمولاً این فولادها موارد استفاده ویژه و محدودی دارند و آلیاژهایی نیستند که معمولاً با آنها سروکار داشته باشیم.

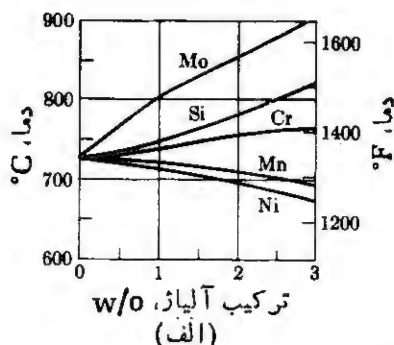
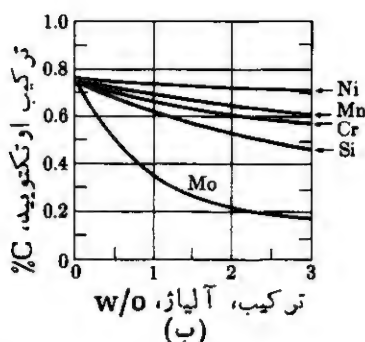
□ **تغییر مکان اوتکتوئید.** شکل ۹-۷-۳ ناحیه اوتکتوئید را برای نمودار فازی «Fe-Fe₃C» یعنی حالتی که فقط آهن و آهن کاربید موجود است نشان می‌دهد. در چنین صورتی دمای اوتکتوئید 727°C (1340°F) و ترکیب آن درست زیر ۰.۸ درصد کربن است. در فولادهای آلیاژی اتمهای آهن و کربن با یکدیگر و سایر انواع اتمها کوئوردینانس می‌شوند بنابراین در صورت وجود عناصر دیگر، تغییر کردن مقدار کربن اوتکتوئید و دمای آن قابل انتظار است. شکل ۹-۹-۱ (الف) تغییر دمای اوتکتوئید را از 727°C ، در صورت افزوده شدن نیکل، منگنز، کرم و مولیبدنیم، نشان می‌دهد. دو عنصر اولی دمای اوتکتوئید را کاهش می‌دهند زیرا با آهن محلول جامد fcc به‌وجود می‌آورند.

جدول ۹-۹-۱ نامگذاری فولادهای AISI و SAE

ترکیب	اعداد AISI یا SAE
فولادهای ساده کربنی*	۱۰××
فولادهای ساده (برای بالابردن قابلیت ماشینکاری به این فولاد مجدداً گوگرد اضافه شده است)	۱۱××
منگنز (۰.۲۵-۱.۰٪)	۱۵××
مولیبدنیم (۰.۲۵-۰.۳۵٪)	۴۰××
کرم (۰.۱۲۵-۰.۴۵٪)، مولیبدنیم (۰.۰۲۵-۰.۰۸۵٪)	۴۱××
نیکل (۰.۲۵-۰.۶۵٪)، کرم (۰.۴۵-۰.۹۵٪)	۴۳××
مولیبدنیم (۰.۲۵-۰.۳۵٪)	
مولیبدنیم (۰.۲۵٪)	۴۴××
نیکل (۰.۲۵-۰.۴۵٪)، مولیبدنیم (۰.۰۳۵-۰.۱۵٪)	۴۶××
نیکل (۰.۳۷۵-۰.۳۲۵٪)، مولیبدنیم (۰.۰۳۵-۰.۰۲۵٪)	۴۸××
کرم (۰.۱۲۵-۰.۷۵٪)	۵۱××
کرم (۰.۱۵-۰.۷۵٪)، وانادیم (۰.۱۵٪)	۶۱××
نیکل (۰.۲۵-۰.۴۵٪)، کرم (۰.۳۵-۰.۵۵٪)	۸۱××
مولیبدنیم (۰.۰۸-۰.۱۵٪)	
نیکل (۰.۳۵-۰.۷۵٪)، کرم (۰.۴۵-۰.۸۵٪)	۸۶××
مولیبدنیم (۰.۰۸-۰.۲۵٪)	
نیکل (۰.۴۵-۰.۷۵٪)، کرم (۰.۴۵-۰.۶۵٪)	۸۷××
مولیبدنیم (۰.۲۵-۰.۳۵٪)	
سیلیسیم (۰.۱۸-۰.۲۲٪)	۹۲××

×× مقدار کربن ۰.۰۰۵٪

* تمام فولادهای ساده کربنی حدوداً حاوی ۰.۵۵٪± منگنز و مقداری (۰.۵w/o <) عناصر دیگرند.



شکلی ۹-۹-۱ نقاط اوتکتوئید در آلیاژهای Fe-X-C (X: سومین جزء یعنی Mo، Si، Cr، Mn یا Ni است). اثر اضافه کردن عناصر آلیاژی روی الف) دمای واکنش اوتکتوئید و ب) اثر آنها روی مقدار کربن اوتکتوئید.

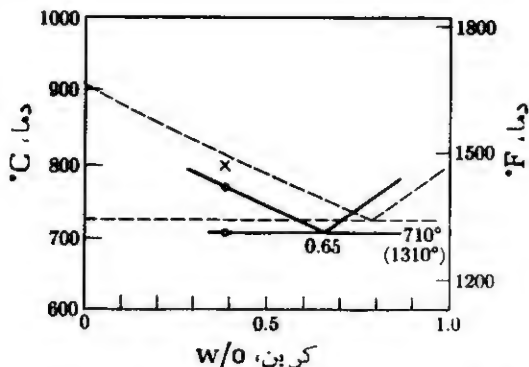
استنیت سازند)، Cr و Mo دمای اوتکتوئید را بالا می‌برند زیرا این عناصر خود bcc بوده و بنابراین در فولادها فریت سازند. شکل ۹-۹-۱ (ب) نشان می‌دهد که هر کدام از این عناصر آلیاژی مقدار کربن اوتکتوئید را از ۰.۷۷٪ کاهش می‌دهد. این منحنیها از این جهت با ارزش اند که پیش‌بینی دمای استنیتی کردن به‌منظور عملیات گرمایی فولادهای کم کربن را میسر می‌سازند.*

مثال ۹-۹-۱ فولاد SAE ۱۵۴۰ (C=۰.۳۹٪؛ Mn=۰.۹۷٪) باید استنیتی شود (الف) اگر لازم باشد گرمایش، ۳۰°C بالاتر از حد استنیت انجام گیرد تا واکنش تسهیل شود، دمای لازم چقدر است؟
ب) در حین سرد شدن چقدر پرلایت تشکیل می‌شود؟

حل: طبق شکل ۹-۹-۱ نقطه اوتکتوئید به ۰.۶۵٪ C، $T_e = 710^\circ\text{C}$ منتقل شده است. در ۰.۳۹٪ C کناره پایینی ناحیه γ تقریباً در 770°C است (شکل ۹-۹-۲)
الف) $800^\circ\text{C} (1470^\circ\text{F}) = 770^\circ\text{C} + 30^\circ\text{C}$
ب) ۰.۶ = کسر γ در 711°C (باز درونی بین ۰.۵ و ۰.۶۵٪ در شکل ۹-۹-۲)
۰.۶ = نسبت پرلایت باینتر از 710°C

توضیح. می‌توان فرض کرد که ضریب زاویه خطوط حلالیتی که ناحیه γ را مشخص می‌کنند با اضافه کردن مقدار کمی از عناصر آلیاژی تغییر نمی‌کند. (در صورت بالا بودن مقدار عناصر آلیاژی، این فرض صحت نخواهد داشت.)
در صورت عدم وجود ۰.۹۷٪ Mn، دمای استنیتی کردن « $810 + 30^\circ\text{C}$ » می‌شد و تنها نیمی از فولاد، پرلایت می‌شد.

* نمودارهای فازي مواد چند جزئی بیش از حد پیچیده‌اند.



شکل ۲-۹-۹ تغییر مکان اوتکتوئید (مثال ۹-۹-۱). با اضافه کردن ۲٪ Mn، ترکیب اوتکتوئید به ۰٫۶۵٪ کربن و دمای آن به ۷۱۰°C (۱۳۱۰°F) کاهش می‌یابد. بنابراین گامای بیشتری برای تشکیل پرلیت وجود دارد.

مرور و بررسی مطالب

در این فصل دوهدف دنبال می‌شد:

۱. تأکید بر این نکته که برای کنترل و اصلاح مواد چندفاز باید چگونگی استخراج اطلاعات لازم را از نمودارهای فازی دانست.
۲. بررسی سیستم Fe-C به طور دقیق تا به عنوان الگوی نمونه در ساختارهای حالت جامد فصل ۱۰ و برای کنترل میکروساختارها در فصل ۱۱ به کار آید.

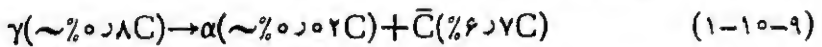
خلاصه: نمودارهای فازی

از نمودار فازی که نموداری از منحنیهای حدحلالیت است، سه نوع اطلاعات می‌توان به دست آورد:

۱. نمودار فازی نشان می‌دهد که در شرایط تعادل برای دما و ترکیبهای مختلف چه فاز (یا فازهایی) وجود دارد.
۲. ترکیب شیمیایی فازهایی که در حال تعادل اند را با استفاده از نمودار فازی می‌توان دریافت: الف) در نواحی تک فاز ترکیب همان ترکیب آلیاژ است؛ ب) در ناحیه دوفازی، ترکیب شیمیایی فازها در محل تقاطع همدمایا منحنیهای حد حلالیت واقع است. ترکیب شیمیایی را بر حسب درصد اجزاء گزارش می‌دهند.
۳. کسر مقدار هر فاز را در آلیاژ دوفازی نیز می‌توان با درون یابی در طول همدمایا تعیین کرد، این همان «قاعده اهرم» است. این مقادیر را می‌توان بر حسب درصد فازی بیان کرد.

خلاصه: نمودار Fe-Fe_۳C

سیستم آهن-کربن دارای ناحیهٔ اوتکتیک است که اساس وجود چدن‌هاست، ولی مبنای وجود فولادها آن است که آهن در دماهای بالا fcc می‌شود و می‌تواند کربن موجود را در خود حل کند. بنابراین فولاد معمولاً به صورت مادهٔ تک‌فاز پتک‌کاری و گرمکاری می‌شود. محلول جامد fcc (استنیت یا γ) حین سرد شدن به فریت bcc (α) و کاربید (\bar{C}) تجزیه می‌شود. این تجزیه، واکنشی اوتکتوئید است



عملیات گرمایی فولاد شامل تشکیل استنیت و سپس تجزیهٔ مستقیم یا غیرمستقیم آن است (فصل ۱۰) تا میکروساختارهای مختلفی به دست آید. میکروساختار به دست آمده خواص فولاد را کنترل می‌کند (فصلهای ۱۰ و ۱۱).

دو گروه عمده از فولادها عبارت‌اند از (۱) فولادهای سادهٔ کربنی و (۲) فولادهای کم‌آلیاژ. گروه نخست صرفاً آلیاژ Fe-Fe_۳C هستند و دستهٔ دوم تا پنج درصد عناصر آلیاژی از قبیل W، Mo، Cr، Ni، Mn یا Si دارند.

فهرست نمودارهای فازی

شکل	صفحه	شکل	صفحه
C-Fe _۳ C	۱-۷-۹	Ag-Cu	۲-۲-۹
C-Fe _۳ C	۳-۷-۹	Al-Cu	۳-۵-۹
Cu-Ni	۱-۲-۹	Al-Mg	۲-۵-۹
Cu-Sn	۲-۵-۹	Al-Ni	۲-۲-۱۰
Cu-Zn	۱-۵-۹	Al-Si	۸-۵-۹
Fe-O	۵-۵-۹	Al _۲ O _۳ -SiO _۲	۳-۲-۹
FeO-MgO	۶-۵-۹	Al _۲ O _۳ -ZrO _۲	۲-۲-۹
H _۲ O-NaCl	۲-۱-۹	BaTiO _۳ -CaTiO _۳	۷-۵-۹
Pd-Sn	۳-۱-۹	C-Fe	۲-۱-۱۳

تشریحات

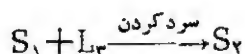
- با استفاده از شکل ۹-۱-۲، روشی برای تصفیهٔ آب دریا پیشنهاد کنید.
- در اقیانوسهای قطب شمال (-۱۵°C) اگر مقدار NaCl تا ۲.۵٪ کاهش یابد، ذوب شدن برفها متوقف می‌شود. چرا؟
- شرح دهید که چرا اگر غسل در ظرف روباز نگهداری شود «شکرک» می‌زند.

۴. دمای خط انجماد، حد دمای مهمی برای فرایندهای گرمکاری فازات است چرا؟
۵. فرق بین ترکیب شیمیایی فاز و مقدار فاز را ذکر کنید.
۶. چرا ترکیب مایع اوتکتیک، L_2 همیشه بین ترکیبات دوجامد، S_1 و S_2 قرار می گیرد؟
۷. چرا ترکیب تعادلی دوفاز همیشه در محدوده ای قرار دارد که در آن، همدم از ناحیه دوفاز عبور می کند؟
۸. برای به دست آوردن کسر مقدار دوفازی توان از درون یابی در جهت همدمای افقی استفاده کرد. نمی توانیم با درون یابی در جهت خط عمودی ترکیب، جواب درستی به دست آوریم. با استفاده از لحیم $70\text{Pb}-30\text{Sn}$ نشان دهید که چرا از حالت اخیر نمی توان استفاده کرد.
۹. عملیات جبری را، که درست قبل از رابطه (۳-۴-۹) به آنها اشاره شد، انجام دهید. (داهنمایی: از رابطه (۲-۴-۹) \times رابطه (۳-۴-۹) قرار دهید.)
۱۰. محاسبات تعیین «مرکز ثقل» را برای تعیین کسر مقدار فاز انجام دهید. نشان دهید که نتیجه این محاسبات با «قاعده اهرم» و «روش درون یابی» یکسان است.
۱۱. □ شرح دهید که چرا مقدار a در آلیاژ $80\text{Ag}-20\text{Cu}$ در دمای اوتکتیک قابل تعیین نیست. ولی اگر 50 گرم α در 100 گرم آلیاژ داشته باشیم در صورت وجود تعادل، دما باید 780°C باشد.
۱۲. شکلی از نمودار فازي Cu-Sn (شکل ۲-۵-۹) در محدوده $475^\circ\text{C}-575^\circ\text{C}$ و ناحیه ($33\% - 10\%$ Sn) با مقیاس بزرگتر رسم کنید. مسئله ای طرح کنید که در آن ترکیب فازي و مقادیر آنها خواسته شده باشد.
۱۳. میله بلندی از سلیسیم را از گرمکن کوچکی به آهستگی عبور می دهند و در نتیجه «تصفیه ناحیه ای» انجام می شود. به طوری که ناحیه ذوب شده از یک سر آن شروع و به طرف انتهای دیگر حرکت کند و پس از گذشتن از ناحیه گرم شده منجمد شود. شرح دهید که چرا با تکرار این عمل می توان ناخالصیها را از حذف کرد. (به مثال ۱-۵-۹ رجوع کنید).
۱۴. فرض کنید اتم کربنی در محل $1/2, 1/2, 0$ در فریت قرار داشته باشد. عدد کوئوردیناسیون آن چقدر است؟ در هر سلول واحد چه تعداد از این مکانها وجود دارد؟
۱۵. بر اساس توضیحات مثال ۹-۶-۱، شرح دهید که چرا در فاز $D > D_c$ در فاز D ، با وجود آنکه استنیت می تواند چند برابر فریت، اتمهای کربن را در خود حل کند.
۱۶. داده های شکل ۳-۷-۹ در موارد مختلف در این کتاب مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین ارزش حفظ کردن را دارد زیرا در این صورت دیگر لازم نیست هر بار به آن مراجعه کنید.
۱۷. پرلیت ساختاری دوفازی شامل α و \bar{C} است. فرق بین فازها و میکروساختارها را ذکر کنید.
۱۸. در حل مثال ۹-۸-۲ (الف) به فریت اوتکتوئید و فریت پرواوتکتوئید اشاره شد.

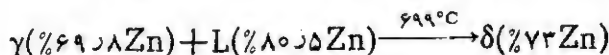
بر اساس شکل‌های ۹-۸-۲ (د) و ۹-۷-۳ تفاوت آنها را شرح دهید.
۱۹. الگوی نامگذاری AISI-SAE را برای کسی که شیمی می‌داند ولی این درس را نخوانده است شرح دهید.

□ ۲۰. حدس بزنید که آیا تنگستن (bcc) دمای تجزیه استنیت را بالایی برد یا پایی می‌آورد؟
۲۱. شکل ۴-۳-۲ اکسید آهن با ساختار NaCl را نشان می‌دهد، تحت چه شرایطی این ساختار معیوب پایدار است؟ این اکسید آهن با اکسید کردن قطعه‌ای از آهن در هوا در 1000°C تشکیل می‌شود. ترکیب این پوسته در امتداد ضخامت آن چگونه تغییر می‌کند؟

۲۲. دستور آزمایشی را بنویسید که تغییر آهن از فریت به استنیت را نشان دهد (این آزمایش برای تکرار باید برگشت‌پذیر و قابل نشان دادن به‌حاضرین در کلاس باشد).
□ ۲۳. واکنش



با اونکتیک تفاوت دارد و واکنش پریکتیک نامیده می‌شود. اگر چه در این فصل در مورد آن بحث نشد ولی واکنشی معمول است. مثلاً، در سیستم Cu-Zn



واکنشهای پریکتیک دیگری که در نمودارهای فازی این بخش آمده را ذکر کنید.
□ ۲۴. سؤال ۲۳ را بخوانید. واکنش پریکتوئید مشابه آن است با این تفاوت که فقط شامل فازهای جامد است. در سیستم Al-Cu یا سیستم Al-Mg واکنش پریکتوئید را تعیین کنید، و رابطه‌ای بنویسید که در آن فازها و ترکیبات ذکر شده باشد.
□ ۲۵. «قانون فازها» برای فشار ثابت به‌صورت زیر است

$$V = C + 1 - P$$

که در آن P تعداد فازهای موجود، C تعداد اجزا و V تعداد متغیرهایی است که بدون تغییر P وجود خواهد داشت. با استفاده از مثال ۹-۲-۳ قاعده فازها را نشان دهید.
□ ۲۶. نمودار فازی شرایط تعادل را ارائه می‌دهد. ولی فرض کنید که آلیاژ ۹۰Al-۱۰Mg از 600°C سریعاً سرد شود. این امر چگونه بر ترکیب فازها اثر می‌گذارد؟ اگر از 400°C سرد شود چطور؟

مسائل

۹-۱-۱ شربتی از مقادیر مساوی آب و شکر درست شده است. ۱۰۰ گرم از این شربت در 80°C چند گرم دیگر شکر را می‌تواند در خود حل کند؟

جواب: ۱۳۸ گرم دیگر

۹-۱-۲ لحیم سرب- قلع مذابی؛ ترکیب اوتکتیک دارد. پنجاه گرم از آن تا 200°C گرم شده؛ چند گرم قلع در این لحیم قابل حل است؟

۹-۱-۳ لحیم $90\text{Pb}-10\text{Sn}$ با افزایش بیشتر قلع در 200°C ذوب می شود. کمترین مقدار قلعی که باید به ۱۰۰ گرم از این لحیم غنی از سرب اضافه شود چقدر است؟

جواب: ۱۰۴ گرم قلع اضافی

۹-۱-۴ يك تن نمك (NaCl) پس از يك طوفان زمستانی در خیا با آنها پاشیده شده است. دما $15^{\circ}\text{C} - (5^{\circ}\text{F})$ است. چندتن یخ توسط این نمك ذوب می شود؟

۹-۱-۵ الف) هشت گرم نمك (NaCl) به ۳۲ گرم یخ اضافه می شود. کمیته دما برای آنکه یخ کاملاً ذوب سرد چقدر خواهد بود؟ بیست گرم دیگر یخ به آب نمك بالا اضافه می کنیم. کمیته دما برای آنکه یخ کاملاً ذوب شود چقدر است؟

جواب: الف) $17^{\circ}\text{C} - (1^{\circ}\text{F})$ ب) $10^{\circ}\text{C} - (14^{\circ}\text{F})$

۹-۱-۶ حدحلالیت روی در برنج α در 780°C ، ۳۵٪ است. می خواهیم با ذوب کردن مقداری برنج ۱۵-۸۵ و مقداری روی، ۱۰۰ کیلوگرم برنج ۳۵-۶۵ درست کنیم. چه مقدار از هر کدام باید در پاتیل ذوب شود؟

۹-۲-۱ مفرغ $90\text{Cu}-10\text{Sn}$ به آهستگی از 1100°C تا 20°C سرد شده است. چه فازی (یا فازهایی) با ادامه سرد کردن به وجود خواهد آمد؟

جواب: $1100 \rightarrow 1020^{\circ}\text{C}$ ؛ L ؛ $1020 \rightarrow 830^{\circ}\text{C}$ ؛ $L + \alpha$ ؛ $830 \rightarrow 340^{\circ}\text{C}$ ؛ α ؛ $340 \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ ؛ $(\alpha + \epsilon)$

۹-۲-۲ برنج $65\text{Cu}-35\text{Zn}$ از 300°C تا 1000°C گرم می شود. پس از افزایش هر 100°C چه فازی (یا فازهایی) به وجود می آید.

۹-۲-۳ آلیاژی حاوی $90\text{Pb}-10\text{Sn}$ است. الف) در 200°C ، 100°C و 300°C چه فازهایی وجود دارد؟ ب) در چه گستره (یا گستره هایی) از دما فقط يك فاز وجود دارد؟

جواب: الف) 100°C ؛ $\alpha + \beta$ ؛ 200°C ؛ α ؛ 300°C ؛ α (به مقدار کم) $+ L$ ب) فقط α ، $150-270^{\circ}\text{C}$ ؛ فقط L بالای 305°C

۹-۲-۴ مخلوط اوتکتیک Al_2O_3 و ZrO_2 در 2400°C ذوب می شود. الف) در چه

دمایی (یا دماهایی) فقط يك فاز وجود دارد؟ ب) دو فاز چگونه؟ سه فاز چگونه؟

۵-۲-۹ خط انجماد را در نمودار Cu-Zn مشخص کنید. (شکل ۹-۵-۱ را ببینید).

جواب: درست زیر تمام ناحیه $x+L$ با خطوط افقی در 903° ، 835° ، 699° ، 598° و 424° قرار دارد.

۶-۲-۹ خط ذوب و خط انجماد را که از 1538°C در $100\% \text{ Fe}$ و 1599°C برای Fe_3O_4 امتداد دارد مشخص کنید. (یادداشت: ۲ ناحیه مایع وجود دارد که در آن فاز مایع از اکسید مایع جدا شده است.) (شکل ۹-۵-۵ را ببینید).

۷-۲-۹ مراحل تغییر فازها را هنگامی که ترکیب آلیاژی از $100\% \text{ Cu}$ تا $100\% \text{ Al}$ تغییر می‌کند، الف) در 700°C ، ب) در 450°C ، ج) در 900°C حساب کنید. (شکل ۹-۵-۳ را ببینید).

جواب: ج) در 900°C : α ، β ، $\alpha+\beta$ ، $\beta+\gamma_1$ ، β ، $\gamma_1+\epsilon_1$ ، γ_1 ، ϵ_1+L ، L

۸-۲-۹ الف) مراحل تغییر فاز را هنگامی که ترکیب آلیاژ در 300°C از $100\% \text{ Mg}$ تا $100\% \text{ Al}$ تغییر می‌کند، نشان دهید. ب) در 400°C همین فاز را تکرار کنید (شکل ۹-۵-۴ را ببینید).

۹-۲-۹ بعضی از نواحی نمودار Cu-Sn (شکل ۹-۵-۲) نامگذاری نشده‌اند. در 625°C چه ناحیه‌هایی الف) بین β و δ ، ب) بین γ و γ_1 قرار می‌گیرند؟
جواب: از دنباله ... ۲-۱-۲ استفاده کنید تا جواب را بیابید.

۱۰-۲-۹ در نمودار Al-Cu (شکل ۹-۵-۳) چه ناحیه‌هایی در طرف راست γ_2 قرار می‌گیرند؟

۱۱-۲-۹ با مراجعه به شکل ۹-۵-۴، در 500°C حد حلالیت منیزیم الف) در جامد α ب) در مایع، چقدر است؟ ترکیب شیمیایی فاز(ها) در آلیاژ $40\% \text{ Al}-60\% \text{ Mg}$ در 500°C چیست؟ د) در آلیاژ $20\% \text{ Al}-80\% \text{ Mg}$ چگونه؟

جواب: الف) $11\% \text{ Mg}$ ب) $76\% \text{ Mg}$ ج) مایع: $40\% \text{ Al}-60\% \text{ Mg}$ د) مایع: $24\% \text{ Al}-76\% \text{ Mg}$ ؛ $92.5\% \text{ Al}-7.5\% \text{ Mg}$

۱۲-۲-۹ با مراجعه به شکل ۹-۲-۲، در 2000°C حد حلالیت Al_2O_3 الف) در مایع، ب) در β ، چقدر است؟ ج) ترکیب شیمیایی فاز(ها) در $80\% \text{ Al}_2\text{O}_3-20\% \text{ ZrO}_2$ در 1800°C چیست؟ د) در 2000°C چگونه؟

۱۳-۲-۹ ترکیب شیمیایی فاز(ها) در مسئله ۹-۲-۲ چیست؟

جواب: 300°C ، 400°C ، 500°C ، 600°C ، 700°C : $\alpha(65\text{Cu}-35\text{Zn})$ ؛ 800°C : $\alpha(66\text{Cu}-34\text{Zn})$ و $\beta(61\text{Cu}-39\text{Zn})$ ؛ 900°C : $\alpha(67.5\text{Cu}-32.5\text{Zn})$ و $\beta(\sim 63\text{Cu}-37\text{Zn})$ ؛ 1000°C : مایع ($65\text{Cu}-35\text{Zn}$)

۹-۳-۴ ترکیب شیمیایی فاز(ها) در مسئله ۹-۲-۱ چیست؟

۹-۳-۵ الف) واکنش اوتکتیک را برای یکی از دو اوتکتیک سیستم Al-Cu (شکل ۹-۵-۳) بنویسید؛ ب) برای اوتکتیک دوم تکرار کنید.

جواب: الف) $\alpha(92.5\text{Cu}) + \beta(90\text{Cu}) \xrightleftharpoons{1035^{\circ}} \alpha(91.5\text{Cu})$ مایع

۹-۳-۶ در سیستم Al-Mg (شکل ۹-۵-۴) واکنش اوتکتیک را برای اوتکتیکی که منیزیم بیشتری دارد بنویسید.

۹-۴-۱ آلیاژ $10\text{Mg}-90\text{Al}$ ذوب و سپس آهسته سرد می‌شود؟ الف) در چه دمایی اولین جامد پدیدار می‌شود؟ ب) در چه دمایی $2/3$ مایع و $1/3$ α دارد؟ ج) در چه دمایی $1/2$ مایع و $1/2$ α دارد؟ د) برای $\alpha + 99$ و مقدار ناچیزی مایع چطور؟

جواب: الف) 620°C ؛ ب) 600°C ؛ ج) 585°C ؛ د) 520°C

۹-۴-۲ مسئله ۹-۴-۱ را برای آلیاژ $10\text{Al}-90\text{Mg}$ تکرار کنید.

۹-۴-۳ چه ترکیبی از Cu و Ag دارای ترکیبات زیر است؟ الف) $1/4\alpha$ و $3/4\beta$ در 600°C ؛ ب) $1/2$ مایع و $3/4\beta$ در 800°C .

جواب: الف) $26\text{Ag}-74\text{Cu}$ ؛ ب) $23\text{Ag}-77\text{Cu}$

۹-۴-۴ چه ترکیبی از Al_2O_3 و ZrO_2 دارای ترکیبات زیر است؟ الف) $3/4\alpha$ و $1/4\beta$ در 1800°C ؛ ب) $3/4$ مایع و $1/4\beta$ در 1950°C .

۹-۴-۵ حلالیت قلع در سرب جامد در 200°C ، 18% است. حلالیت سرب در فلز مذاب در همان دما 44% است. ترکیب آلیاژی حاوی 40% مایع و 60% جامد α در 200°C چیست؟

جواب: 66.8% Pb ، 33.2% Sn

۹-۴-۶ الف) در چه دمایی آلیاژ مونل (70% نیکل، 30% مس) حاوی $2/3$ مایع و $1/3$ جامد خواهد بود و ب) ترکیب مایع و جامد چه خواهد بود؟

۹-۴-۷ در مسئله ۹-۲-۱ فرض کنید 1500 گرم مفرغ موجود باشد. جرم فاز(های) جامد در فاصله هر 100°C چقدر است؟

جواب: 1100°C ، صفر گرم؛ 1000°C ، $150\text{ g } \alpha$ ؛ 800°C ، 400°C ، $1500\text{ g } \alpha$ ؛
 300°C ، $135\text{ g } \alpha$ + $150\text{ g } \epsilon$

۹-۴-۸ در 175°C ، چند گرم α در 71 g لحیم Pb-Sn اوتکتیک وجود دارد؟
 ۹-۴-۹ در مسئله ۹-۲-۲، با 200 g ترکیب $65\text{ Cu}-35\text{ Zn}$ ، چند گرم α در هر دما وجود دارد؟

جواب: $700^{\circ}\text{C} \rightarrow 300^{\circ}\text{C}$ ، $200\text{ g } \alpha$ ؛ 800°C ، $180\text{ g } \alpha$ ؛ 900°C ، $80\text{ g } \alpha$ ؛
 1000°C ، $0\text{ g } \alpha$

۹-۴-۱۰ دو کیلو گرم نقره استرلینگ ($92.5\text{ Ag}-7.5\text{ Cu}$) از 1000°C تا 400°C به آهستگی سرد می شود. الف) روی منحنی درصد Ag (محور عرضها) بر حسب $^{\circ}\text{C}$ (محور طولها) ترکیب α را بکشید؛ ب) روی منحنی مقدار α (محور طولها) بر حسب $^{\circ}\text{C}$ (محور عرضها) مقدار α را بکشید. (داده های روی شکل ۹-۲-۴ دارای دقت ۱ قسمت در ۱۰۰ قسمت است. منحنی شما نیز به همین نسبت باید دقیق باشد.) ج) منحنی خود را تا 20°C برون یابی کنید.

۹-۴-۱۱ مقدار α را در 158 kg آلیاژ $5\text{ Si}-95\text{ Al}$ به صورت تابعی از دما رسم کنید.

جواب: 0°C ، 15 kg ؛ 576°C ، 153 kg ؛ 578°C ، 11 kg ؛ 600°C ، 824 kg ؛
 620°C ، $> 0\text{ kg}$

□ ۹-۴-۱۲ در چه دمایی آلیاژ $40\text{ Cu}-60\text{ Ag}$ می تواند حاوی 55% باشد؟

۹-۵-۱ آلیاژی از 50 g Cu و 30 g Zn ذوب و به آرامی سرد شده است. الف) در چه دمایی $40\text{ g } \alpha$ و $40\text{ g } \beta$ موجود خواهد بود؟ ب) $50\text{ g } \alpha$ و $30\text{ g } \beta$ چگونه؛ ج) $30\text{ g } \alpha$ و $50\text{ g } \beta$ چگونه؟

جواب: الف) 780°C ؛ ب) 750°C ؛ ج) 800°C

۹-۵-۲ الف) ترکیب شیمیایی فازها در آلیاژ 10% منیزیم- 90% آلومینیم در 600°C ، 400°C ، 200°C چیست؟ ب) مقادیر این فازها در هر دمای قسمت (الف) چقدر است؟ ج) برای توزیع منیزیم و آلومینیم در آلیاژ فوق در 600°C ، موازنه مواد را بنویسید.

۹-۵-۳ برای P گرم آلیاژ $8\text{ Cu}-92\text{ Ag}$ در 500°C (شرایط تعادل) موازنه مواد را بنویسید.

جواب: $938\text{ g } \alpha$ ، $2\text{ Cu}-98\text{ Ag}$ ؛ $98\text{ g } \beta$ ، $62\text{ g } \alpha$ ، $99\text{ Cu}-1\text{ Ag}$

۹-۵-۴ برای 100 گرم آلیاژ $10\text{ Al}-90\text{ Mg}$ در 200°C (به فرض تعادل) موازنه مواد را بنویسید.

۹-۵-۵ آلیاژ $5\text{ Si}-95\text{ Al}$ که برای ریخته گری تحت فشار به مصرف می رسد طوری

سرد شده است که فلز حاوی α اولیه (بروآوتکتیک) و مخلوط اوتکتیک ($\alpha + \beta$) است. چه کسری از قطعه ریختگی، α اولیه است؟

۹-۵-۶ چه مقدار مولیت در آجر $40\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 60\% \text{SiO}_2$ (۱۰ kg) در شرایط تعادل در دماهای زیر موجود خواهد بود: (الف) 1400°C (ب) 1580°C (ج) 1600°C

۹-۵-۷ (الف) ترکیب آلیاژ Al-Si را که حاوی $1/3$ مایع و $2/3$ جامد است، در 600°C و در شرط تعادل معین کند؛ (ب) ترکیب شیمیایی مایعات را بنویسید.

جواب: (الف) $96\text{Al}-4\text{Si}$ و $29\text{Al}-71\text{Si}$ ؛ (ب) $91\text{Al}-9\text{Si}$ و $86\text{Al}-14\text{Si}$

۹-۵-۸ براساس شکل‌های ۹-۱-۳ و ۹-۴-۲ برای آلیاژی حاوی $80\% \text{Pb}$ و $20\% \text{Sn}$ شکلی بکشید که (الف) کسر مقدار مایع را برحسب دما نشان دهد؛ (ب) نسبت α را برحسب دما و (ج) کسر β را برحسب دما نمایش دهد.

۹-۵-۹ (الف) درصد Cu را در فاز α نقره استرلینگ ($92.5\text{Cu}-7.5\text{Ag}$) برحسب دما رسم کنید؛ (ب) کسر α را در نقره استرلینگ برحسب دما بکشید.

۹-۵-۱۰ روی کاغذ رسم، نمودار فازی آلیاژی از فلزات A و B را از روی داده‌های زیر رسم کنید. تمام نواحی نمودار خود را نامگذاری کنید.

نقطه ذوب A 700°C

نقطه ذوب B 1000°C

دمای اوتکتیک 500°C

ترکیب مایع در حالت

تعادل در دمای اوتکتیک 30w/o A و 70w/o B

حلالیتها در 500°C : $15\text{w/o} = \text{A در B}$

$20\text{w/o} = \text{B در A}$

حلالیتها در 70°C : $15\text{w/o} = \text{A در B}$

$8\text{w/o} = \text{B در A}$

۹-۵-۱۱ شصت کلوگرم از مفرغ $90\text{Cu}-10\text{Sn}$ (که قرار است از آن زنگی ساخته شود) ذوب و سپس خیلی آهسته سرد شده است تا تعادل برقرار باشد. (الف) در چه دمایی اولین جامد پدیدار می‌شود؟ (ب) ترکیب جامد چیست؟ (ج) در چه دمایی مقدار جامد دو برابر مقدار مایع است؟ (د) در چه دمایی آخرین مایع ناپدید می‌شود؟ (ه) ترکیب آن مایع چیست؟ (و) چه فازی (یا فازهایی) در 600°C وجود دارند. ترکیب و مقدار هر فاز را معین

کنید. ز) چه فاز (یا فازهایی) در 300°C وجود دارد. ترکیب و مقدار هر فاز را بنویسید.

۹-۵-۱۲ یک کیلوگرم نقره استرلینگ حاوی ۷۵ گرم مس (۹۲۵ گرم نقره) است. روشی برای به دست آوردن حداقل ۱۰۰ گرم نقره با $2\% <$ مس از آلیاژ فوق پیشنهاد کنید. از ذوب کردن، انجماد مرحله‌ای و مراحل جداسازی استفاده کنید. (می‌توانید خط ذوب و خط انجماد را به صورت خطوط مستقیم فرض کنید.)

۹-۶-۱ پیشینه حلالیت کربن در فریت (α) برابر 0.025 W/o است. به ازای هر اتم کربن چه تعداد سلول واحد وجود دارد؟

جواب: ۵۴۰

۹-۶-۲ چگالی کاربید آهن 7.6 Mg/m^3 (7.6 g/cm^3) است. حجم سلول واحد مکعب مستطیل که در بخش ۹-۶ شرح داده شده چقدر است؟

۹-۶-۳ در 920°C ، پیشینه حلالیت کربن در استنیت (γ) برابر 0.33 W/o است. به ازای هر اتم کربن چه تعداد سلول واحد وجود دارد؟

جواب: ۴۲۰

۹-۶-۴ براساس داده‌های شکل ۱-۳-۱ و مثال ۳-۴-۱، منحنی تقریبی حجم-دما را برای آهن بین 0°C و T_m رسم کنید. اگر لازم است تخمینی بزنید، فرضیات خود را بنویسید.

۹-۶-۱ با استفاده از نمودار $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ ، کسر α و کسر کاربید موجود را در 700°C در فلزی که حاوی ۲٪ کربن و ۹۸٪ آهن است محاسبه کنید.

جواب: ۳۰٫۰ کاربید، ۷۰٫۰ فریت

۹-۶-۲ الف) چه فازهایی در فولاد 0.2C-Fe در 800°C موجود است؟ ب) ترکیب آنها را بنویسید. ج) نسبت هریک چقدر است؟

۹-۶-۳ تغییرات فازی به وجود آمده بر اثر گرم کردن فولاد کربنی ۰٫۲۰٪ از دمای اتاق تا 1200°C را شرح دهید (فریت، α ؛ استنیت، γ ؛ کاربید، Fe_3C).

جواب: $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C}) \rightarrow 727^{\circ}\text{C}$ ؛ $(\alpha + \gamma) \rightarrow 727^{\circ}\text{C}$ ؛

$(\alpha + \gamma) \rightarrow 855^{\circ}\text{C}$

در این حالت α در حال کاهش است و در 855°C به صفر می‌رسد؛ فقط $0.0012-0.005\text{ C}$

۹-۷-۴ بدون مراجعه به نمودار فازی $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ ، ترکیب فازها را در مسئله قبل معین کنید.

مواد چند فاز: نمودارهای فازی ۴۵۹

۵-۷-۹ واکنش اوتکتوئید سیستم $\text{BaTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ (شکل ۹-۵-۷) را بنویسید.

جواب: $\beta(24\% \text{CaTiO}_3) \xrightarrow{1450^\circ} \alpha(20\% \text{CaTiO}_3) + \gamma(90\% \text{CaTiO}_3)$

۶-۷-۹ الف) چهار اوتکتوئید موجود در سیستم Cu-Sn (شکل ۹-۵-۲) را ذکر کنید؛ ب) در دومورد از چهار مورد فوق واکنش را بنویسید.

۷-۷-۹ بامراجعه به شکل ۹-۷-۴، کسر فازها را برای فولاد $99\text{Fe-}1\text{C}$ ارائه دهید.

۸-۷-۹ مسئله قبل را برای فولاد $99.8\text{Fe-}0.2\text{C}$ تکرار کنید.

۹-۸-۹ درصد فریت، کاربید، و پرلیت را در دمای اتاق در آلیاژ آهن-کربن حساسی (الف) ۵۰٪ کربن؛ ب) ۸۰٪ کربن؛ و ج) ۱۵٪ کربن حساب کنید.

جواب: الف) ۷۵٪ کاربید، ۹۲.۵٪ پرلیت؛ ب) ۱۲٪ کاربید، ۸۸٪ پرلیت؛ ج) ۲۲.۵٪ کاربید، ۷۷.۵٪ پرلیت

۹-۸-۹ الف) فازهای موجود، ترکیب هریک از این فازها، و مقدار نسبی هر فاز را برای فولاد ۱.۲٪ کربن در 870°C ، 760°C ، 700°C معین کنید. (به فرض برقراری تعادل). ب) در هریک از دماهای فوق چه مقدار پرلیت وجود دارد؟

۹-۸-۳ به فرض برقراری تعادل، برای فولاد $99.5\text{Fe-}0.5\text{C}$ مقادیر زیر را تعیین کنید. الف) کمترین دما برای ۱۰۰٪ ب) کسر مقدار γ در 730°C و ترکیب آن؛ ج) کسر مقدار پرلیت در 720°C و ترکیب کلی آن؛ د) کسری از آنکه در 730°C فریت پرواوتکتوئید است؛ ه) کسری از آنکه پس از سرد شدن از 730°C در 720°C فریت پرواوتکتوئید است.

جواب: الف) 780°C ؛ ب) ۶۰٪ در تقریباً 0.8C ؛ ج) ۹۹.۲٪؛ د) ۴۰٪ در 0.2C

۹-۸-۴ $99\text{Fe-}1\text{C}$ را جانشین فولاد مسئله قبل کرده سپس آن را حل کنید.

۹-۸-۵ الف) مقدار پرلیت را در آلیاژ $99.1\text{Fe-}0.9\text{C}$ که از 870°C به آهستگی سرد شده است معین کنید. مبنای ۱۱ کیلوگرم آلیاژ؛ ب) از نتایج قسمت (الف) مقدار فریت و کاربید را در 725°C معین کنید؛ ج) در 20°C نیز این مقادیر را بیابید.

جواب: الف) ۱۰۸۸ kg؛ ب) ۹۵۵ kg α ، ۱۴۵ kg β ؛ ج) ۹۵۵ kg α ، ۱۵ kg β

۹-۸-۶ براساس مطالب این فصل برای سپر اتومبیل فولاد پرکربن را انتخاب می کنید یا فولاد کم کربن را؟ دلایل آن را بنویسید.

۹-۹-۱ فولادی ترکیب زیر را دارد. عدد AISI-SAE آن را معین کنید: ۱۰۲۱C،

۰۰۶۱Ni، ۰۰۱۳Mo، ۰۰۶۲Cr، ۰۰۶۹Mn

جواب: AISI ۸۶۲۰

۹-۹-۲ فولادی ترکیب زیر را دارد. عدد AISI-SAE آن را معین کنید: ۰۰۳۸C، ۰۰۷۵Mn، ۰۰۸۷Cr، ۰۰۱۸Mo، ۰۰۰۳Ni.

۹-۹-۳ مقادیر کسری فاز(ها) را در 750°C ، 700°C ، 800°C و 900°C برای فولادهای زیر حساب کنید. الف) $992\text{Fe}-8\text{C}$ ؛ ب) $988\text{Fe}-2\text{C}$ ؛ ج) $988\text{Fe}-0.6\text{Mo}-0.6\text{C}$.

جواب: الف) 700°C ، $0.12\bar{\text{C}}-88\alpha$ ؛ 750°C ، 800°C ، 900°C ، $0.06\bar{\text{C}}-94\gamma$ ؛ 800°C ، 700°C ، 800°C ، $0.18\bar{\text{C}}-82\alpha$ ؛ 750°C ، $0.04\bar{\text{C}}-94\gamma$ ؛ 800°C ، $0.35\bar{\text{C}}-96.5\gamma$ ؛ 900°C ، 0.07γ (ج) 700°C ، 750°C ، 800°C ، $0.09\bar{\text{C}}-91\alpha$ ؛ 800°C ، $0.1\bar{\text{C}}-99.9\gamma$ ؛ 900°C ، 0.07γ ($\bar{\text{C}} = \text{کاربید}$).

۹-۹-۴ شکل ۹-۷-۳ را برای فولادی حاوی الف) ۱٪Mn؛ ب) ۱٪Cr؛ ج) ۱٪Ni شرح دهید. (منحنی جدید حلالیت تقریباً به موازات منحنی قبلی می ماند).

۹-۹-۵ چه مقدار نیکل باید به فولاد اضافه شود تا انتهای پایینی گستره پایداری استنیت تا ۴۰٪کربن، همان قدر، که با ۲٪Mn کاهش می یابد، پایین آید.

جواب: تقریباً ۲۲٪Ni

مواد چندفاز: میکروساختارها

چشم انداز فصل

نمودارهای فازی فصل ۹، پایه‌ای کمی برای ترکیب و مقادیر فازها به دست داد. فرض شد که تعادل برقرار باشد. در مورد زمان لازم برای رسیدن به تعادل یا میکروساختارهای به دست آمده مطالب چندانی ارائه نشد. این فصل به این مطالب می‌پردازد.

ابتدا واکنشهای حالت جامد را براساس تعداد فازهای موجود، میزان نوآرایی اتمی، و اطلاعات ترکیبی لازم طبقه‌بندی می‌کنیم. سپس به هندسه میکروساختارها توجه خواهیم کرد. این امر ارتباط دادن خواص به میکروساختارها را ممکن می‌سازد.

هدف از مطالعه

۰۱. درك واكنشهای اصولی كه ساختار داخلی مواد جامد را تغییر می دهند.
۰۲. به كاربردن روابط آرنیوس در مورد واكنشهایی كه به وسیله نفوذ محدود می شوند و درك کیفی علت به تأخیر افتادن واكنشها در هنگامی كه فازهای جدید باید جوانه بزنند.
۰۳. تفاوت قائل شدن بین شرایطی كه موجب به وجود آمدن واكنشهایی در مرز دانه ها و در داخل دانه ها می شود.
۰۴. مربوط کردن خواص مکانیکی به تغییرات میکروساختاری، مثل مقدار، اندازه، شكل، و توزیع فازها.
۰۵. مربوط کردن خواص فیزیکی مهم، از نظر کیفی به تغییرات میکروساختاری.

۱-۱۰ واكنشهای فاز جامد

تمام تغییرات میکروساختاری جامدات شامل نوآرایی اتمهاست. ابتدا در بخش ۶-۶ هنگام بررسی تبلور مجدد با تغییرات میکروساختاری مواجه شدیم. تبلور مجدد واكنشی بسیار ساده در حالت جامد است زیرا تغییر ترکیب شیمیایی در آن صورت نمی گیرد. همچنین ساختار بلوری به همان شكل باقی می ماند و هراتم همان کوئوردیناسیون اتمی سابق را خواهد داشت. مثلاً در صورتی كه fcc باشد عدد کوئوردیناسیون ۱۲ خواهد بود. ولی اتمها برای ساختن بلورهای کاملتری از دانه های تغییر شكل یافته قبلی نوآرایی می کنند. این امر فوراً صورت نمی گیرد. زمان لازم تابعی از دما و سایر متغیرهاست. (به شكلهای ۶-۶-۳ و ۶-۶-۴ رجوع کنید.)

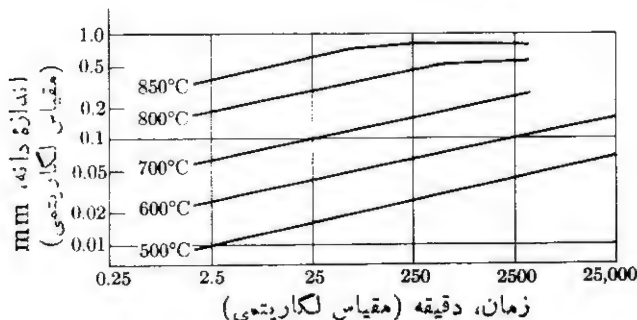
واكنشهایی كه در جامدات صورت می گیرند را می گیرند را می توان به راههای مختلف طبقه بندی كرد. در اینجا این كار به صورت زیر انجام شده است:

۱. دشد دانه ها. عبور اتمها از مرز دانه ها ($\ll 1 \text{ nm}$)؛ بدون تغییر در ترکیب و ساختار بلوری؛ بدون ایجاد دانه های جدید.
۲. تبلور مجدد. دانه های جدید و كاملتر؛ فقط نوآرایی اتمی موضعی ($\ll 1 \text{ nm}$)؛ بدون تغییر در ترکیب ساختار بلوری.
۳. تغییرات چندشكلی. فاز جدید و بنا بر این كوئوردیناسیون اتمی جدید به همراه نوآرایی موضعی ($\ll 1 \text{ nm}$)؛ بدون تغییر در ترکیب.
۴. الف) حل شدن. ناپدید شدن فاز موجود با حل شدن در فاز اولیه؛ نفوذ اساسی اتمها ($\gg 1 \text{ nm}$).
- ب) دسوب. جدا شدن فاز جدید از محلول جامد فوق اشباع شده، نفوذ اساسی اتمها ($\gg 1 \text{ nm}$).

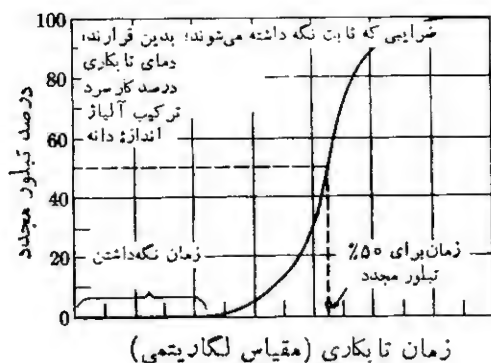
۵. واکنشهای اذکتوئید. تجربه يك فاز (درحین سردشدن) به دوفاز جدید، نفوذ اساسی آنها ($\gg 1 \text{ nm}$).
 ۶. تبدیل مارتنزیتی. تغییر چندشکلی بابرش يك یا چند صفحه اتمی نسبت به صفحات مجاور؛ بدون نفوذ ($\ll 1 \text{ nm}$).
 این فهرست شامل تمام موارد نیست ولی می توان آن را پایه ای دانست برای درك عملیات گرمایی مختلف (فصل ۱۱) و میکروساختارهای حاصل و خواص آنها.
 نکات برجسته فهرستهای بالا بدین قرارند: (۱) آیا فاز جدید تشکیل شده است یا خیر و (۲) آیا حرکت اتمی فقط شامل نوآرایی موضعی اتمهاست ($\ll 1 \text{ nm}$) یا شامل نفوذ پرمده در فواصل چندسلول اتمی می شود ($\gg 1 \text{ nm}$).

رشد دانه ها (مواد تك فاز). این واکنش، که در بخش ۶-۷ مورد بحث قرار گرفت، به زماني برای جوانه زنی نیاز ندارد زیرا اتمها در عرض مرز دانه از دانه ای که قبلاً وجود داشته به دانه دیگر حرکت می کنند. سرعت واکنش به دما حساس است (شکل ۱-۱۰-۱)، زیرا برای فعالسازی پرش اتمها، انرژی گرمایی لازم است، و نیز تابعی از انحنای مرز دانه است؛ بنابراین بارشد دانه ها سرعت واکنش کاهش می یابد.

تبلور مجدد. اگر چه از این واکنش فاز جدیدی به وجود نمی آید ولی تأخیری صورت می گیرد، زیرا دانه های جدید باید جوانه بزنند. دانه های جدید معمولاً ابتدا در امتداد نواحی لغزشی در دانه هایی که قبلاً تغییر شکل یافته اند، تشکیل می شوند [شکل ۱-۱۰-۶ (ب)]. پیشرفت واکنش تبلور مجدد معمولاً طبق منحنی S شکل، یا منحنی دوحمه صورت می گیرد. (شکل ۱-۱۰-۲). مثلاً آلومینیم (خالص تجارتي و تا ۵٪ سرد کاری شده) در 310°C در ۵۰ ساعت اول دارای تبلور مجدد قابل اغماضی است [شکل ۱-۱۰-۳ (الف)]، ولی پس از کلاً ۷۰ ساعت تا ۵۰٪ تبلور مجدد پیدا می کند [شکل ۱-۱۰-۳ (ب)]. تکمیل نهایی تقریباً به ۱۰۰ ساعت نیاز دارد.



شکل ۱-۱۰-۱۰ رشد دانه (برنج). رشد لکاریتمی ادامه می یابد تا ابعاد دانه ها به ابعاد نمونه فلز، به ضخامت 1 mm ، نزدیک شود.



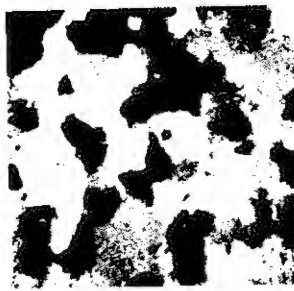
شکل ۱۰-۱-۲ تبلور مجدد همدمما.



(الف) گرم شده به مدت ۵۰ ساعت



(د) ۱۰۰ ساعت



(ج) ۸۰ ساعت



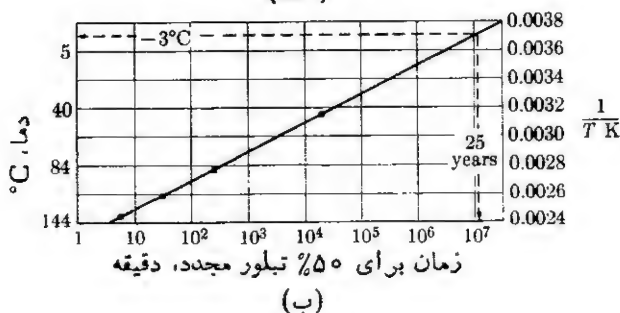
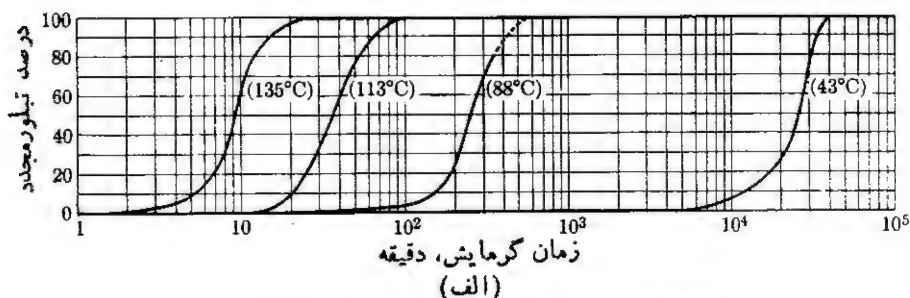
(ب) ۷۰ ساعت

شکل ۱۰-۱-۳ پیشرفت تبلور مجدد همدمما در 310°C (590°F) برای آلومینیم (۹۹٫۹۵٪) که ۵٪ سردکاری شده است. مدت گرم کردن (الف) ۵۰ ساعت؛ (ب) ۷۰ ساعت؛ (ج) ۸۰ ساعت؛ (د) ۱۰۰ ساعت، (بزرگنمایی ۷۵).

پیشرفت تبلور مجدد به همین ترتیب در دماها، ولی در زمانهای متفاوت صورت می گیرد [(شکل ۱۰-۱-۴) الف]. تبلور مجدد مس فوق العاده خالص (۹۹۹۹٪) که (۹۸٪) سردکاری شده در همان شکل دیده می شود. می بینید که زمان لازم برای تبلور مجدد به میزان ۵۰٪، نسبتاً به سادگی مشخص شده است زیرا واکنش در آن نقطه بیشترین سرعت را دارد. وقتی زمان این نقطه از واکنش را به دمای تبلور مجدد مربوط می کنیم. رفتار آرنیوس را که انتظار داریم، مشاهده می کنیم [(شکل ۱۰-۱-۴) ب]، زیرا حرکت اتمها در واکنش تأثیر می کند، که آن نیز به نوبه خود به انرژی فعالسازی بستگی دارد. رابطه ریاضی شکل ۱۰-۱-۴ ب) به صورت زیر است

$$\ln t = C + \frac{B}{T} \quad (10-1-1)$$

که در آن C و B ثابتهای رابطه اند. می توانیم این رابطه را به روابط (۴-۷-۴) و (۸-۸-۱) مربوط کنیم به شرط آنکه تشخیص دهیم که سرعت زیاد واکنش R (در زمان کم، زیرا $R = 1/t$) به نفوذ سریع بستگی دارد. بنابراین



شکل ۱۰-۱-۴ تبلور مجدد همدمای مس خالص (۹۹۹۹٪) (الف) تبلور مجدد همدمای مس خالص که ۹۸٪ سرد کاری شده؛ ب) برای برون یابی از داده های چهار منحنی قسمت (الف) استفاده کنید.

$$\ln R = \ln R_0 - \frac{E}{kT} = -\ln t \quad (2-1-10)$$

که در آن C و B در رابطه (۱-۱-۱۰) به ترتیب $-\ln R_0$ و E/k هستند (مثال ۶-۶-۲ را نیز ببینید).

واکنشهای چند شکلی. مواد خالص ممکن است از يك شکل به شکل دیگر فازی تبدیل شوند

$$\text{فاز } A \rightleftharpoons \text{فاز } A : \text{واکنش چندشکلی} \quad (3-1-10)$$

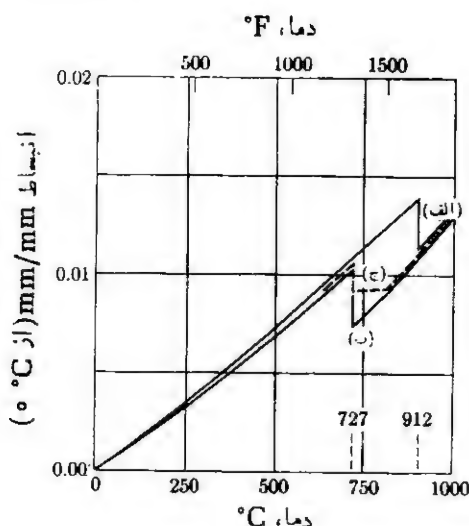
الگوی اولیه برای این واکنش که در بخش ۹-۶ بررسی شد تبدیل $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ آهن در 912°C بود. مثالهای آشنای دیگر در مورد تغییرات چند شکلی عبارت است از تبدیل α به β در تیتانیم و تبدیل کوارتز به تریدایمیت و به کریستوبالیت در SiO_2 . این تبدیلات معمولاً از تغییر در دما به وجود می آیند. ولی تبدیل چندشکلی مانند آنکه بین گرافیت و الماس وجود دارد، نتیجه تغییرات فشار است.

تبدیل فاز همراه با تغییرات چگالی و حجم است زیرا ساختارهای چندشکلی، ضریب فشردگی اتمی یکسانی ندارند. برای آهن bcc و fcc ضریب فشردگی به ترتیب ۰۸۶۸ و ۰۷۴ است و بنابراین در 912°C تغییر ابعاد قابل ملاحظه‌ای وجود دارد [شکل ۱-۱۰-۵ (الف)]. با این حال برای اینکه این تغییر دقیقاً در دمای تبدیل و بدون تأخیر صورت گیرد باید گرم کردن یا سرد کردن کاملاً آهسته انجام شود.

بنابراین تعریف، دمای تبدیل دمایی است که در آن دو فاز برای واکنش شیمیایی انرژی یکسانی دارند. بنابراین پایتتراز 912°C استنیت از فریت فعالتر است زیرا انرژی آزاد بیشتری دارد، یعنی استنیت ناپایدار و فریت پایدار است. بلافاصله بالای 912°C عکس آن صادق است؛ یعنی فاز پایدار آهن خالص، استنیت است زیرا آهن bcc به آهن fcc تبدیل می شود.

چون در واکنشهای چندشکلی ترکیب واکنشگر و محصول یکسان است معمولاً این واکنشها به حرکات اتمی اندکی نیاز دارند (رابطه ۱-۱۰-۳). با وجود این لازم است که پیوندهای موجود شکسته شود و اتمها به صورت ساختار جدیدی نوآرایی یابند.

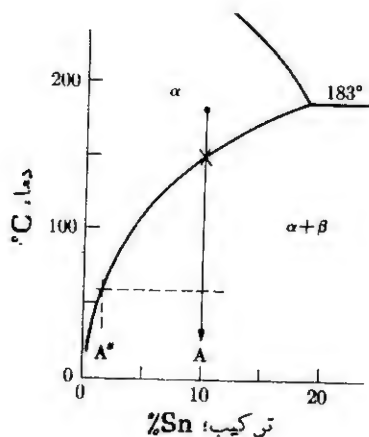
حل شدن و رسوب کردن در جامدات. این دو واکنش که در شکل ۱-۱۰-۶ رسم شده‌اند عکس یکدیگرند. پایتتر از دمای 150°C در آلیاژی با ۹۰٪ Pb و ۱۰٪ Sn دو فاز α و β موجود است. بالای 150°C تمام قلع در α (fcc) است. در نتیجه اگر فلز گرم شود جامد β در جامد α حل می شود و هرگاه پس از عمل حل شدن در بالای 150°C این آلیاژ تا ناحیه دو فازی سرد شود، رسوب جامد به وجود می آید. این رسوب برای آلیاژهای مختلف پیرسختی مفید است (فصل ۱۱). روابطی که خواهد آمد مربوط به این دو واکنش در آلیاژهای



شکل ۱۰-۱-۵ تغییر ابعاد با تبدیلات فازی در آهن و آلیاژهای آهن-کربن. الف) آهن خالص؛ ب) $8C-99.2Fe$ (ج) $4C-99.6Fe$ ، تبدیل فقط در صورتی در دمایی که در نمودار فازی تعیین شده است انجام می‌گیرد که دما بسیار آهسته تغییر کند و حالت تعادل پدید آید.

دو تایی اند. باید توجه کرد که در هر کدام از واکنشها فقط دوفاز شرکت دارند. ولی همین که آلیاژ از حد حلالیت بگذرد ترکیب محلول از A به $A\#$ تغییر می‌کند (شکل ۱۰-۱-۶).

(۱۰-۱-۶) جامد A $\xrightarrow{\text{گرم کردن}}$ جامد B + جامد $A\#$: عمل حل شدن

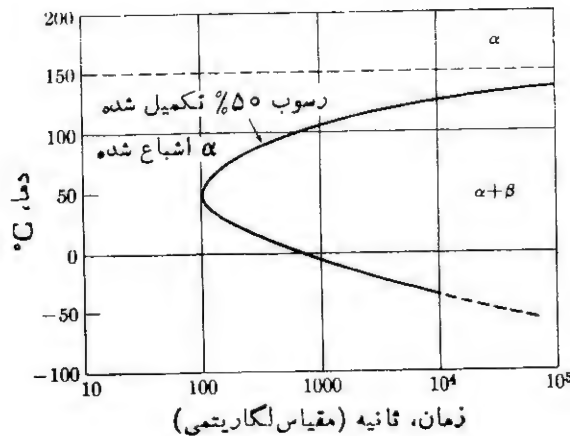


شکل ۱۰-۱-۶ عمل حل شدن و رسوب کردن (آلیاژ $10Sn-90Pb$). در دماهای بالا تمام قلع در α حل می‌شود. سرد شدن موجب واکنش رسوب جامد می‌شود.

(۵-۱-۱۰) جامد B + جامد A $\xrightarrow{\text{سرد کردن}}$ جامد A: رسوب کردن

این واکنشها به نفوذ احتیاج دارند. مثلاً ۹۵w/o Al و ۴۵w/o Cu در نظر بگیریم، که آلیاژ بر مصرف آلومینیم است. طبق شکل ۹-۵-۳ پایتتر از 500°C (930°F) دو فاز θ و κ در حال تعادل اند. فاز θ را CuAl_2 تشکیل می دهد به طوری که کسر اتمهای مس در آن به مراتب بیشتر از κ است. در حین عمل حل شدن اتمهای مس باید در ساختار κ نفوذ کنند تا به وضعیتهای جانشینی تصادفی برسند. به همین ترتیب هنگام رسوب کردن اتمهای مس باید روی ذرات CuAl_2 (یعنی θ) که در حال رشدند جمع شوند.

اکنون به آلیاژ ۹۰ Pb-۱۰ Sn شکل ۱۰-۱-۶ برمی گردیم، زمان لازم برای وقوع واکنش رسوب را در نظر می گیریم. بالای 150°C ، فقط α (غنی از Pb) پایدار است؛ زیر 150°C ، در صورتی که زمان کافی باشد مقداری β (غنی از Sn) از α فوق اشباع شده جدا خواهد شد. شکل ۱۰-۱-۷ زمان لازم برای رسوب همدم (تا ۵۰٪ کامل شده) را نشان می دهد که در آن آلیاژ سریعاً تا دمای برگزیده سرد شده سپس در آن دما نگه داشته می شود تا رسوب به وجود آید. خواهیم دید که با افزایش دما از 50°C تا دمای اتاق، زمان لازم کاهش می یابد. در این گستره دما، سرعت ایجاد رسوب، توسط نفوذ محدود می شود. در حدود 50°C ، الگوی ارائه شده عکس می شود و مدت ها طول خواهد کشید تا به پایان نمودار، که زیر حد حلالیت 150°C است، برسد. از آنجا که در سایر واکنشها نیز همین منحنی نوع C را خواهیم داشت باید به این تغییر جهت توجه داشته باشیم.

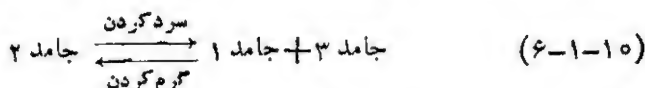


شکل ۱۰-۱-۷ رسوب همدم (۹۰ Pb-۱۰ Sn). بالای 150°C ، α حاوی تمام قلع موجود است. سرعت ایجاد رسوب β با مقدار موقوع-سرمایش زیر دمای اشباع تغییر می کند. در نهایت، تعادل شکل ۹-۱-۳ به دست می آید.

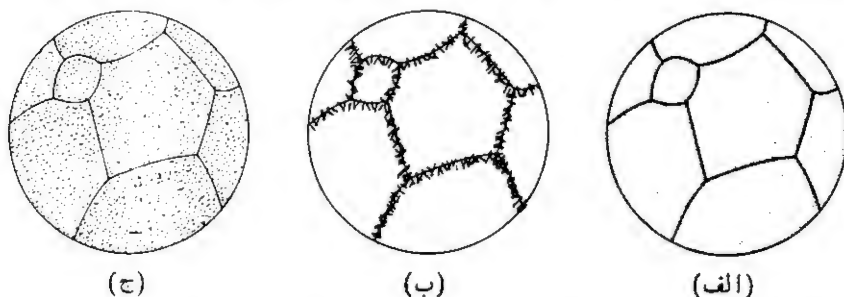
بالای زانوی منحنی رسوب همدم، سرعت به وسیله نفوذ محدود نمی شود، زیرا اتمها می توانند نسبتاً سریع نفوذ کنند (50°C برابر تقریباً $0.6T_m$ است). در عوض محدودیت این واکنش به علت زمان لازم برای جوانه زنی فاز جدید β است. جوانه زنی در مرز دانه های α بسیار ساده تر صورت می گیرد [شکل ۸-۱-۱۰ (ب)]. اتمهای قلع از فواصل اتمی بسیاری عبور می کنند تا به این مکانها می رسند.

زیر زانوی منحنی رسوب همدم، سرعت ایجاد رسوب توسط نفوذ اتمهای قلع محدود می شود. اتمها نمی توانند به سادگی نفوذ کنند؛ علاوه بر این فوق اشباع زیاد است. بنابراین ذرات جدید β هر جا که ممکن باشد، اعم از عیوب نقطه ای مثل تهیجیه ها و اتمهای بین نشین، در طول خطوط نابجایی، و در جوار ناخالصیه ها، جوانه می زنند. این امر در میان دانه ها صورت می گیرد. بنابراین میکروساختار متفاوتی را می بینیم [شکل ۸-۱-۱۰ (ج)] در مقابل شکل ۸-۱-۱۰ (ب).

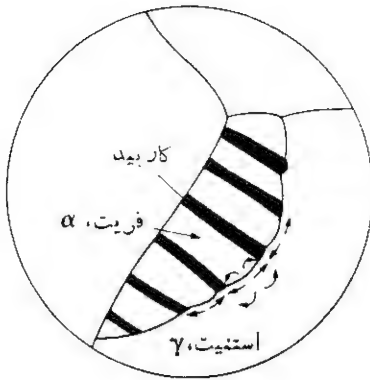
واکنشهای اوتکتوئید. این واکنشها معمولاً در حقیقت در سیستم Cu-Sn (شکل ۵-۹) چهار اوتکتوئید وجود دارد. در بعضی از نمودارهای فازی فصل ۹ نیز چند اوتکتوئید وجود دارد. هر يك از آنها واکنش عمومی زیر را دارد



اگر جامد ۲ دارای ترکیب اوتکتوئید باشد، واکنش اوتکتوئید در دمای معینی به نام دمای اوتکتوئید صورت می گیرد. با سرد کردن، واکنشی صورت می گیرد که طی آن فازی که



شکل ۸-۱-۱۰ رسوب فاز جامد (طرحواره). (الف) محلول جامد فوق اشباع شده، مثلاً Pb-10Sn که از 180°C تا 20°C به سرعت سرد شده است؛ (ب) رسوب در مرز دانه ها. این امر به نفوذ پر دانه ها، جایی که جوانه زنی بسیار ساده تر صورت می گیرد، نیاز دارد؛ (ج) رسوب بین دانه ای. بسیاری از عیوب کوچکتر دانه ها موجب جوانه زنی فاز جدید می شوند؛ بنابراین فواصل نفوذ ساختار (ب) کوتاه تر است. اگر دمای رسوب بالا باشد ساختار (ب)، و اگر پایین باشد ساختار (ج) به وجود می آید.



شکل ۱۰-۱-۹ تشکیل فریت، کربن باید از میان استنیت اوتکتوئید (تقریباً ۸۰٪) نفوذ کند تا کاربید (۷۶٪) تشکیل دهد. فریت حاصل مقدار قابل اغماضی کربن دارد.

دارای ترکیب میانینی است به دو فاز دیگر که ترکیبات آنها در دو طرف اوتکتوئید است تبدیل می شود (رابطه ۹-۷-۲).

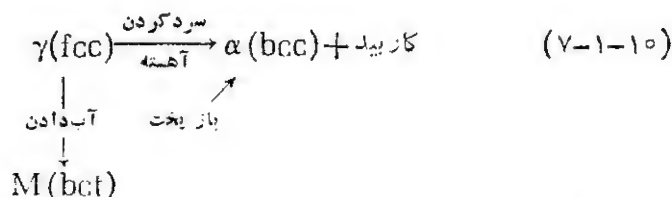
اگر جامد ۲ دارای ترکیب اوتکتوئید نباشد ابتدا بایکی از دو منحنی حدحلالیت مواجه هستیم، به طوری که یکی از فازها قبل از دیگری شروع به جدا شدن می کند. مثلاً در آلیاژ $Fe-99.6C$ ۴۰ فریت قبل از کاربید جدا می شود؛ در آلیاژ $Fe-99.9C$ ، طبق شکل های ۹-۷-۳ و ۹-۸-۲ (و ابتدا کاربید جدا می شود).

الگوی اولیه برای واکنش اوتکتوئید، تجزیه همدمای استنیت (بخش ۹-۸) است. زمان لازم برای این تجزیه همدمای در بخش ۱۱-۴ بررسی خواهد شد. در آنجا منحنی نوع C، کسه شبیه به منحنی رسوب همدمای ۱۰-۱-۷ است، را برای آلیاژ $Pb-Sn$ خواهیم دید، و مکانیسم رشد پرلیت را مورد توجه قرار خواهیم داد.

رشد پرلیت با تشکیل همزمان فریت، α ، و کاربید C همراه است. این رشد در مرز دانه های استنیت آغاز می شود. لایه های دو فاز به سمت داخل رشد می کنند. با وقوع این عمل کربن باید طبق شکل ۱۰-۱-۹ جدا شود. اگر سرعت سرد کردن آهسته باشد، کربن می تواند تا فاصله بیشتری نفوذ کند و پرلیت داشت (با لایه ضخیم تر) تشکیل می شود. اگر سرعت سرد کردن شتاب گیرد، نفوذ به فاصله کوتاهتری محدود می شود. در نتیجه لایه های بیشتر (و نازکتری) تشکیل می شوند که پرلیت دیز را به وجود می آورند.

طبق شکل ۹-۸-۲ با افزایش مقدار کربن از ۰ تا ترکیب اوتکتوئید (۸۰٪) در فولادهای کربنی ساده مقدار پرلیت می تواند از هیچ به ۱۰۰٪ تغییر کند و نیز کاهشی در مقدار فریت پرواوتکتوئید به وجود می آید. مقدار پرلیت در فولادهای هیپر اوتکتوئید کاهش می یابد زیرا کاربید پر و اوتکتوئید در اطراف دانه های اولیه استنیت شبکه ای تشکیل می دهد.

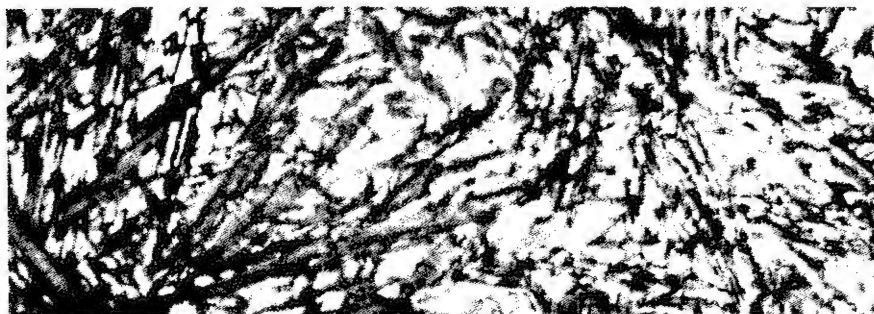
تشکیل مارتنزیت. طبق رابطه (۹-۸-۱)، استنیت به فریت و کاربید ($\alpha + C$) تجزیه می شود و این در صورتی است که به کربن زمان کافی داده شود که از نواحی فریت به کاربید نفوذ کرده. در فاز کاربید متمرکز و از فریت تهی شود. اگر استنیت با سرعت زیاد آب داده شود رابطه (۹-۸-۱) را می توان به صورت زیر تغییر داد



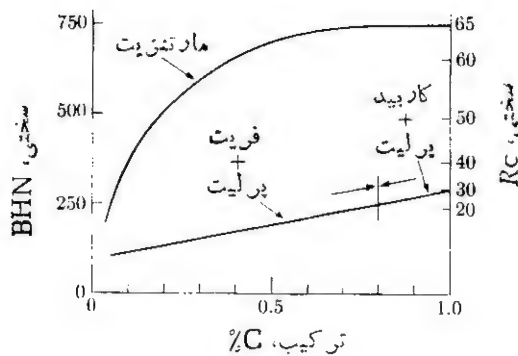
این شوق دیگر تشکیل $(\alpha + \text{کاربید})$ ، شامل فاز انتقالی مارتنزیت M است (شکل ۱۰-۱-۱۰). این فاز چند شکل آهن، پایدار نیست زیرا در صورتی که فرصتی به آن داده شود مارتنزیت به سمت تشکیل $(\alpha + \bar{C})$ می رود. در نتیجه در نمودار Fe-Fe₃C (شکل ۹-۷-۱) مارتنزیت دیده نمی شود. ولی همان طور که خواهیم دید مارتنزیت فاز بسیار مهمی است. مارتنزیت در دماهای پایینتر از اوتکتوئید تشکیل می شود (اما بالاتر از دمای اتاق)، زیرا ساختار fcc استنیت به اندازه کافی ناپایدار است و در نتیجه خسود به خود به طریق خاصی به ساختار مرکزدار تبدیل می شود. این عمل از برش حاصل می شود و نفوذ در آن دخالتی ندارد. تمام اتمها، هماهنگ با یکدیگر تغییر مکان می دهند و هیچ کدام از آنها بیش از کسر نانومتر از همسایه های قبلی خود دور نمی شوند. بدون نفوذ، تغییر بسیار سریع صورت می گیرد و تمام کربن موجود در محلول جامد باقی می ماند. ساختار مرکزدار حاصل به جای مکعبی، چهار وجهی (bct) است که با فزیت کاملاً فرق دارد.

چون ساختار مارتنزیت غیر مکعبی است و کربن در شبکه محبوس می شود، لغزش به آسانی انجام نمی شود و بنابراین مارتنزیت سخت، محکم و شکننده است. شکل ۱۰-۱-۱۱ سختی فولاد پر لیتی و مارتنزیتی را به صورت تابعی از مقدار کربن بساهم مقایسه می کند. این سختی زیاد از نظر مهندسی اهمیت بسیار دارد زیرا فولاد حاصل در مقابل تغییر شکل و سایش بسیار مقاوم است.

وجود مارتنزیت به عنوان فاز نیم پایداری که شامل محلول جامد bct حاوی کربن است نمودار تعادلی آهن کربن را تغییر نمی دهد (شکل ۹-۷-۱). هر گاه در دماهای کمتر



شکل ۱۰-۱-۱۰ مارتنزیت ($\times 1000$). دانه های مجزا به صورت بلورهای صفحه مانندند و همان ترکیب دانه ها در استنیت اولیه را دارند.



شکل ۱۰-۱-۱۱ سختی آلیاژهای تا بکاری شده آهن-کربن (α + کاربید) و سختی مارتنزیت بر حسب مقدار کربن. این اختلاف در سختی به دلیل آب دادن فولاد است.

از دمای اوتکتوئید به مارتنزیت فرصت کافی داده شود، محلول فوق اشباع کربن در آهن به تدریج به فازهای پایدارتر یعنی «فریت و کاربید» تبدیل می شود (رابطه ۱۰-۱-۷). در اصطلاح تجاری این عمل را بازپخت می نامند



(مارتنزیت بازپخت شده) (مارتنزیت)

میکروساختار حاصل ($\alpha + \bar{C}$) مانند پرلایت لایه ای نیست بلکه شامل ذرات پراکنده کاربید است (شکل ۱۰-۱-۱۲) زیرا در فولاد مارتنزیتی مکانهای متعددی برای جوانه زنی وجود دارد. این مارتنزیت بازپخت شده* گرچه کمی نرمتر از مارتنزیت اولیه است، ولی بسیار چقرمه تر از آن و بنابراین محصول مناسبتری است.

مثال ۱۰-۱-۱۱ دو نمونه همانند از مفرغ تا 610°C و 700°C گرم شده اند. انداز دانه اولی در مدت ۳۰ ساعت دوبرابر شده و از 0.05 mm به 0.1 mm رسیده است. نمونه دوم فقط ۳۰ دقیقه در 700°C نگه داشته شده است. زمان لازم برای نگه داشتن قطعه در 750°C را تخمین بزنید.

حل: هر یک به انتقال جرم یکسانی نیاز دارد. از آنجا که رشد دانه یک فرایند نفوذ

* توجه داشته باشید که مارتنزیت بازپخت شده ساختار بلوری مارتنزیت را ندارد. برعکس دارای میکروساختار دوفازی فریت و کاربید است. این میکروساختار از تجزیه مارتنزیت ناشی می شود.



شکل ۱۰-۱-۱۲ مارتنزیت بازپخت شده (فولاد اوتکتوئید $\times 15000$). این فولاد قبلاً آب داده شده تا ساختار راست وجهی مرکزدار (bct) بساختی RC ۶۵ به دست آید. سپس در 425°C (800°F) به مدت یک ساعت بازپخت شده است. مارتنزیت بازپخت شده میکروساختار دو فازیی دارد که حاوی ذرات کاربید (نقاط روشن) در زمینه فریتی (نقاط تیره) است. مارتنزیت بازپخت شده ابتدا بسیار سخت و شکننده بود. با عملیات گرمایی بالا، مارتنزیت بازپخت شده اکنون RC ۴۴ سختی دارد ولی بسیار چقرمه تر است.

است از رابطه آرنیوس استفاده می کنیم

$$\ln R = \ln R_0 - \frac{E}{kT} = -\ln t \quad (2-1-10)$$

یا

$$\ln t = C + \frac{B}{T} \quad (1-1-10)$$

$$\ln 30 \text{ hr} = C + \frac{B}{883 \text{ K}} = 3.40$$

$$\ln 0.05 \text{ hr} = C + \frac{B}{973 \text{ K}} = -0.70$$

با حل همزمان دو معادله خواهیم داشت

$$C = -40.86 \quad \text{و} \quad B = 39100 \text{ K}$$

$$\ln t = -40.86 + \frac{39100 \text{ K}}{1023 \text{ K}}$$

$$t = 0.07 \text{ hr} \quad (4 \pm \text{min})$$

توضیح. اندازه دانه در فاصله زمانی دوم دوبرابر نخواهد شد زیرا با افزایش اندازه دانه سرعت رشد کاهش می یابد.

مثال ۱۰-۱-۲ آلیاژی از Al-Cu در 550°C دارای ۲ درصد اتمی مس در محلول جامد κ است. آن را آب داده و دوباره تا 100°C گرم می‌کنیم تا θ رسوب کند (شکل ۹-۵-۳). فاز θ (CuAl_2) به صورت ذرات بسیار ریزی در تمام آلیاژ پراکنده می‌شود به طوری که فاصله متوسط ذرات از هم فقط 50nm است. الف) در هر سانتی‌متر مکعب تقریباً چند ذره وجود دارد؟ ب) اگر با برون‌یابی منحنی شکل ۹-۵-۳ در 100°C مقدار مس باقیمانده در κ را قابل اغماض فرض کنیم، در هر ذره θ چند اتم مس وجود دارد؟

حل: الف) فرض کنید در هر 50nm یک ذره وجود داشته باشد

$$\sim \frac{1}{(5 \times 10^{-9}\text{m})^3} = \sim 8 \times 10^{24}/\text{m}^3 \quad (\text{یا } \sim 8 \times 10^{15}/\text{mm}^3)$$

$$a_{\kappa} = \frac{4(\sim 0.143\text{nm})}{\sqrt{2}} = \sim 0.404\text{nm}$$

ب) اگر در هر سلول واحد ۲ اتم وجود داشته باشد و درصد اتمی مس ۲ باشد

$$\text{Cu}/\text{m}^3 = \frac{0.02(4\text{ اتم}/\text{اتم})}{(0.404 \times 10^{-9}\text{m})^3}$$

$$= 1.2 \times 10^{27}/\text{m}^3$$

$$\text{Cu در هر ذره} = \frac{(1.2 \times 10^{27}/\text{m}^3)}{(\sim 8 \times 10^{24}/\text{m}^3)}$$

$$= \sim 150 \text{ Cu در هر ذره}$$

توضیح. این میکروساختار تقریباً همان است که در رسوب سختی با آن برخورد خواهیم کرد (بخش ۱۱-۳). ▲

مثال ۱۰-۱-۳ ابعاد سلول واحد bct برای مارتنزیتی که حاوی ۰.۸ w/o کربن (۳.۰۶ a/o کربن) است، عبارت است از $a = 0.2845\text{nm}$ و $c = 0.2945\text{nm}$. ثابت شبکه استتیت در همین دما و با همین ترکیب برابر 0.3605nm است. تغییر حجم در هنگام تبدیل γ به مارتزیت چقدر خواهد بود؟

حل: مبنا: ۲ اتم Fe، یا ۲ سلول واحد مارتزیت و ۱ سلول واحد γ

$$\frac{\Delta V}{V_{\gamma}} = \frac{2(0.2845\text{nm})^2(0.2945\text{nm}) - (0.3605\text{nm})^3}{(0.3605\text{nm})^3}$$

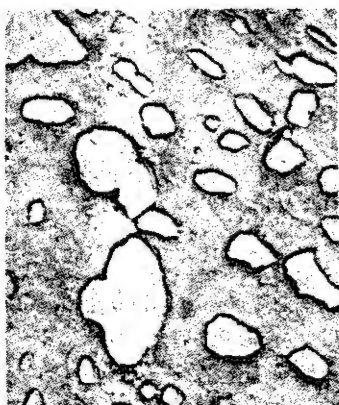
$$= +0.018 \quad (\text{یا } 1.8\text{ v/o})$$

توضیح. این تغییر حجم موجب تنشهای باقیمانده‌ای در فولاد آب داده شده می‌شود. مثلاً ابتدا سطح چرخ‌دنده‌ای فولادی به مارتنزیت تبدیل می‌شود (درحالی که مرکز آن هنوز استنیت تغییر شکل پذیر و گرم است). اندکی بعد مرکز آن به مارتنزیت تبدیل می‌شود که با انبساط حجمی همراه است. این امر موجب می‌شود که سطح تحت تنش قرار گیرد و در مارتنزیت کشش ایجاد شود (و استنیت تبدیل شده فشرده شود). این تبدیل را با بازپخت شیشه مقایسه کنید (شکلهای ۸-۷-۵ و ۸-۷-۴). ▲

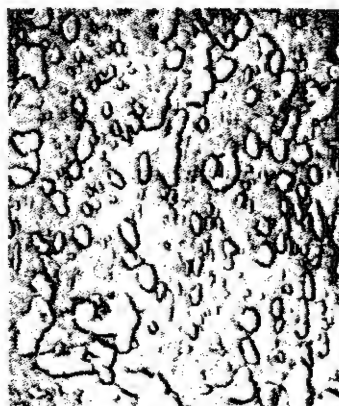
۱۰-۲ میکروساختارهای چندفاز

در شکل ۶-۱-۴ دیدیم که آلیاژ تگ‌فاز می‌تواند دارای چندین متغیر هندسی باشد. متغیرهای میکروساختار عبارت بودند از اندازه، شکل، و جهتگیری. میکروساختار آلیاژهای چندفاز نیز به همین صورت می‌تواند با اندازه، شکل، و جهتگیری فازهای مجزا، تغییر کند. علاوه بر این برای مقدار هر فاز با گستره‌ای روبرو خواهیم بود. بالاخره انواع مختلفی از توزیع فازها را خواهیم دید.

اندازه فاز. مثالی در مورد اختلاف اندازه در شکل ۱۰-۲-۱ دیده می‌شود. این دو میکروساختار از یک فولادند؛ بنابراین ترکیب مشابهی دارند (۹۹٫۲٪ Fe - ۰٫۸٪ C). هردو تحت عملیات گرمایی قرار گرفته و استنیت تشکیل داده‌اند (استنیتی شده‌اند) و سپس آب‌داده شده و مارتنزیت تشکیل داده‌اند. این عملیات با گرم کردن آن تا تشکیل مارتنزیت



۶۷۵°C (۱۲۵۰°F)، ۱۲ ساعت، ۲۰R_c (ب)



۵۹۵°C (۱۱۰۰°F)، ۱ ساعت، ۳۳R_c (الف)

شکل ۱۰-۲-۱ تصاویری از مارتنزیت بازپخت شده زیر میکروسکوپ الکترونی (× ۱۱۰۰۰). هردو فولاد اوتکتویدند که قبلاً آب داده شده‌اند و به‌بیشینه سختی (۶۵ R_c) رسیده‌اند.

بازپخت شده که حاوی فریت و کاربید است (رابطه ۱۰-۱-۸) ادامه یافته است. از آنجا که ترکیب دو نمونه مشابه است، مقادیر یکسانی فریت و کاربید ($\alpha + \bar{C}$) دارند. این دو در اندازه ذرات کاربید باهم تفاوت دارند. فولادی که کاربید ریزتری دارد فقط به مدت یک ساعت در 595°C (1100°F) و دیگری به مدت دوازده ساعت در 675°C (1250°F) بازپخت شده است. در مورد دوم زمان کافی برای تجمع کاربیدها و تشکیل ذرات بزرگتر (ولی کمتر) وجود داشته است.

توجه داشته باشید که دو فولاد شکل ۱۰-۲-۱ سختی متفاوتی دارند. همچنین استحکام آنها با یکدیگر فرق دارد. ذرات سخت کاربید، تغییر شکل پلاستیکی زمینه فریتی نرم و انعطاف پذیر را محدود می کند. مقدار قید مستقیماً به تماس بین دوفاز یعنی مرز بین فازهای فریت و کاربید در واحد حجم، بستگی دارد. بنابراین طبیعی است که کاربید ریزتر، میکروساختار سخت تری ایجاد می کند (مثال ۱۰-۲-۱).

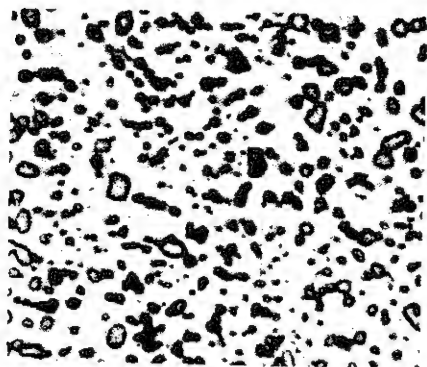
مقدار فاز. مجموعه فولادهایی که در شکل ۹-۸-۲ دیده می شوند به ترتیب کسر بیشتری پرلیت، و بنابراین کاربید، دارند. از آنجا که چگالی پرلیت و کاربید بسیار نزدیک به هم است (به ترتیب 7.88 g/cm^3 و 7.66 g/cm^3)، کسر حجمی دوفاز در فولاد بسیار نزدیک به کسر وزنی آنهاست. این امر در تمام میکروساختارها صحت ندارد. مثلاً لحیم Pb/Sn حاوی دوفاز است که چگالیهای بسیار متفاوتی دارند. بنابراین، کسر حجمی α و β در شکل ۹-۱-۳ باید بار دیگر از روی کسر وزنی محاسبه شود (مثال ۱۰-۲-۲). علاوه بر این می توانیم قاعده مخلوطی برای چگالی، ρ_m ، مخلوط فازها بر اساس کسر حجمی آنها f و چگالی هر فاز بنویسیم

$$\rho_m = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots \quad (10-2-1)$$

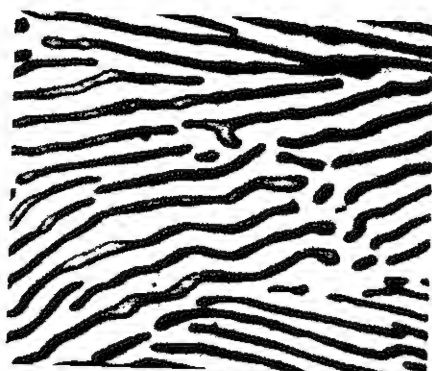
از این رابطه خطی برای محاسبه چگالی نیز می توان استفاده کرد به شرط آنکه کسر حجمی به کار برده شود، زیرا جرمها را می توان بر اساس حجم به سادگی باهم جمع کرد.*

شکل فاز و توزیع آن. دو مثال رایج ولی مختلف درباره شکل فاز و توزیع آن، می توان در مورد فولادهایی با ترکیب اوتکتوئید (تقریباً $99.2\text{Fe}-0.8\text{C}$) ذکر کرد. طبق شکل ۱۰-۲-۲ (الف)، پرلیت مخلوطی لایه ای از فریت به علاوه کاربید است. این فاز فقط از تجزیه استتیتی که مقدار کربن آنها برابر مقدار کربن نقطه اوتکتوئید باشد، تشکیل می شود. دوفاز جدید ($\alpha + \bar{C}$) در مرز دانه های استنیت جوانه می زنند و همراه هم به صورت دانه رشد می کنند (شکل ۱۰-۱-۹). کربن جدا می شود، فریت (0.02C یا 0.2%) به جا

* رابطه (۱۰-۲-۱) را در مورد خواصی مثل مقاومت ویژه و استحکام نمی توان به کار برد، زیرا ضرایب هندسی مثل مسیر رسانی، و سطح بین فازها، که تنها به کسر حجمی مربوط نمی شوند، نیز در آنها اثر دارند.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۲-۱۰ میکروساختار فولادهای اوتکتوئید ($C \ 0.8\%$). (الف) پرلیت ($\times 2500$) که از تبدیل استنیتی (γ) که ترکیب اوتکتوئید دارد، تشکیل می‌شود؛ (ب) ساختار کروی ($\times 1000$) که از بازپخت آن در $700^\circ C$ ($1300^\circ F$) تشکیل شده است.

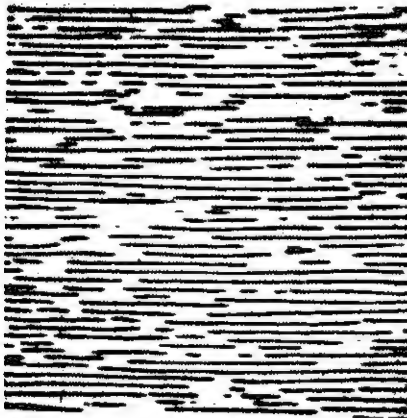
می‌ماند و کربن در کاربید ($\bar{C} \ 6.7\% \sim$) جمع می‌شود.

در شکل ۲-۲-۱۰ (ب) ساختاری کروی داریم. کاربید در ساختار کروی (همان‌طور که از اسم آن پیدا است) به صورت ذرات کسروی شکل پراکنده‌ای در زمینه فریت است. ساختار کروی را می‌توان به دو روش تولید کرد. روش اول بازپخت بیش از حد مارتنزیت است؛ به طوری که عملیات آغاز شده در شکل ۲-۲-۱۰ تا ایجاد کاربید کروی نسبتاً درشتی ادامه یابد. و بین کاربیدها در فواصل وسیعی فریت قرار گیرد. روش دوم گرم کردن پرلیت به مدت زیاد است (۲۴-۱۸ ساعت در $700^\circ C$) به طوری که لایه‌های کاربید به صورت کروی در آیند. نیروی محرکه این تغییر شکل و تبدیل آن به کمره، کاهش مقدار سطح مرز دانه‌هاست.

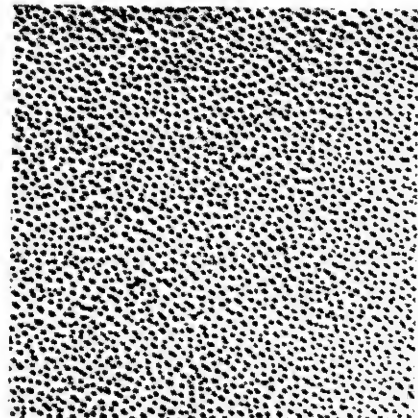
طرحواره مقایسه توزیع فازها نیز در شکل ۸-۱-۱۰ دیده می‌شود. با رسوب در ده‌ای بالا (یا با آهسته سرد کردن)، فاز رسوب کننده جوانه می‌زند و در مرز دانه‌های محلول جامد اصلی رشد می‌کند [شکل ۸-۱-۱۰ (ب)]. بنا بر این شبکه مرز دانه فاز جدیدی را تشکیل می‌دهد. اگر این فاز ترد باشد، خواهیم دید که کل ماده ترد است، زیرا ترک‌های منتشر شده راه‌هایی برای شکست با انرژی کم به وجود آورده‌اند. در عوض فوق سرمایه زیاد بر اثر افت سریع دما، موجب توزیع ریز ذرات رسوب کننده می‌شود [شکل ۸-۱-۱۰ (ج)]. با توزیع ذرات سخت در داخل زمینه انعطاف پذیر، موقعیت مناسبی به دست می‌آید که در آن ذرات سخت موجب قید پلاستیکی می‌شوند و بنا بر این زمینه میکروساختار را مستحکم می‌کنند. در عین حال زمینه نرم، چقرمه است. از آنجا که ترک منتشر شونده باید

از این فاز چقرمه زمینه عبور کند، انرژی لازم است بنابراین چقرمگی کل ماده و همچنین استحکام آن بیشتر می‌شود.

□ به عنوان مثال دیگری از شکل فاز و توزیع آن شکل ۱۰-۲-۳ را در نظر می‌گیریم، که تصاویر طولی و عرضی میکروساختار اوتکتیک آلومینیم و Al_3Ni را نشان می‌دهد. فاز روستر زمینه پیوسته‌ای از آلومینیم است. فاز تیره تر الیاف Al_3Ni ، ترکیب سخت و صلب بین فلزی آلومینیم و نیکل، است. شکل هندسی این میکروساختار با پلاستیک تقویت شده با الیاف شیشه‌ای، قابل مقایسه است. ولی این ساختار با روش کاملاً متفاوتی به وجود آمده است. در این پلاستیکها، می‌توان الیاف را با پیچاندن رشته‌ها دور میله‌ها یا با دسته‌دسته کردن آنها جهتدار کرد. سپس رزینها را به داخل این الیاف نفوذ می‌دهند تا پس از پلی‌مری شدن به صورت ماده‌ای با زمینه پیونددهنده درآیند. میکروساختار شکل ۱۰-۲-۳ در اثر انجماد جهتدار آلیاژ مایعی با ترکیب اوتکتیک، تشکیل شده است (شکل ۱۰-۲-۴). از آنجا که اوتکتیک در محل تقاطع دو منحنی حلالیت قرار دارد، مایع اوتکتیک هنگام انجماد، به طور همزمان دو جامد وجود می‌آورد. اگر گرما فقط از یک جهت خارج شود، انجماد جهتدار است و دو فاز به موازات هم رشد می‌کنند. از آنجا که فاز $(Al_3Ni)\beta$ فاز کمتر است، شکل هندسی الیاف مانندی دارد. این آلیاژها مورد توجه خاص قرار دارند. زیرا روشی برای تولید فلزاتی به دست می‌دهند که با الیاف صلب تقویت شده‌اند.

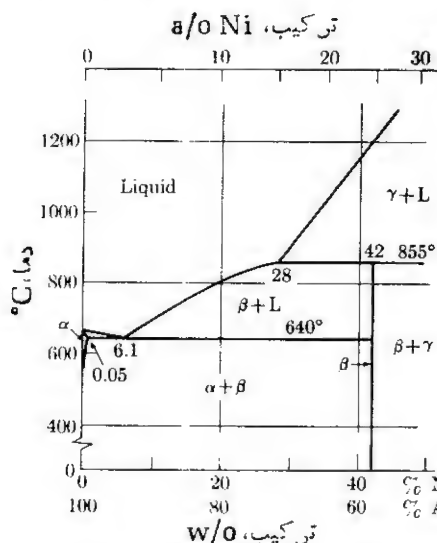


(ب)



(الف)

شکل ۱۰-۲-۳ جهتگیری فاز. در هر میکروساختاری، فازها ارتباط ویژه‌ای از نظر شکل بلوری دارند. (الف) تصویر عرضی؛ و (ب) تصویر طولی میکروساختار اوتکتیک $Al-Al_3Ni$ ($\times 400$).



شکل ۱۰-۲-۴ نمودار Al-Ni. میکروساختار شکل ۱۰-۲-۳ در اثر انجماد جهتدار مایع اوتکتیک (۶۱٪ Ni) تشکیل شده است. دوفاز α و β به طور همزمان به وجود می آیند، درحالی که β فقط ۷٪ حجم (۱۴ w/o) را تشکیل می دهد.

مثال ۱۰-۲-۱ سطح مرزهای بین فازی (mm^2/mm^3) دوارتنزیت بازپخت شده شکل ۱۰-۲-۱۰ (با بزرگنمایی ۱۱۰۰۰) را باهم مقایسه کنید.
 حل: با استفاده از رابطه (۴-۴-۱) و پیرامون شکل میکروسکوپی، در قسمت (ب) داریم

$$P_L = \frac{\sim 20}{215 \text{ mm} / 11000} = \sim 10^3 / \text{mm}$$

$$S_V = \sim 2000 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3$$

در قسمت (الف)

$$S_V = \frac{2(\sim 50)}{215 \text{ mm} / 11000} = \sim 5000 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3$$

توضیح. مارتنزیت بازپخت شده ای که سطح مرز بین فازهای آن بیشتر است سخت تر است. برای مقایسه مستقیم مثلاً سختی، جنبه های دیگر میکروساختار مثل شکل دانه و مقدار فازها باید یکسان باشد.

مثال ۱۰-۲-۲ چگالی لحیم (اوتکتیک) را که در دمای 20°C به حالت تعادل رسیده است حساب کنید.

حل: از آنجا که α و β تقریباً به ترتیب Pb و Sn خالص اند؛ $\rho_\beta = 73 \text{ Mg} / \text{m}^3$

$$\rho_{\alpha} \approx 113 \text{ Mg/mm}^3 \text{ (یا } 113 \text{ Mg/mm}^3 \text{). مبنای: } 619 \text{ mg}\beta = 100 \text{ Mg}$$

$$\text{و } 381 \text{ mg}\alpha$$

$$\beta: \frac{619 \text{ mg}}{773 \text{ mg/mm}^3} = 848 \text{ mm}^3 \quad f_{\beta} = 0.715$$

$$\alpha: \frac{381 \text{ mg}}{113 \text{ mg/mm}^3} = 337 \text{ mm}^3 \quad f_{\alpha} = 0.285$$

$$\text{کل } 1185 \text{ mm}^3$$

$$\rho = 0.715(773 \text{ mg/mm}^3) + 0.285(113 \text{ mg/mm}^3)$$

$$= 844 \text{ mg/mm}^3 \text{ (یا } 844 \text{ Mg/mm}^3 \text{)}$$

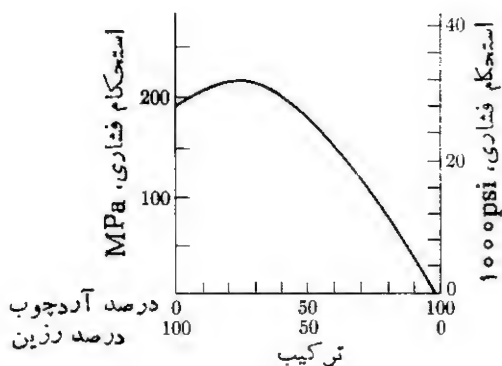
$$\blacktriangle \quad \rho = 100 \text{ mg/} 1185 \text{ mm}^3 = 844 \text{ mg/mm}^3 \text{، در شق دیگر،}$$

۱۰-۳ میکروساختارها: خواص مکانیکی

خواصی مانند سختی و استحکام را نمی‌توان با قواعد ساده مخلوط خواص فازهای شرکت کننده برآورد کرد. مثلاً فولادهای شکل ۱۰-۲-۱ دارای استحکام کششی بیشتر از ۷۰۰ MPa هستند. ولی استحکام فاز زمینه (فریت) کمتر از یک سوم این مقدار است. از آنجا که فریت فازی پیوسته است و بنابراین تمام بار باید توسط آن تحمل شود می‌توان نتیجه گرفت که «زنجیر از ضعیفترین اتصال خود قویتر است». با اینکه برای این حالت منطق ریاضی وجود دارد؛ ولی توضیح کیفی مطلب به سادگی چنین است که ذرات صلب کاربرد جلوی لغزش را می‌گیرند و مانع از برش زمینه ضعیفتر می‌شود.* این را قید پلاستیکی می‌نامیم.

آثار مقدار فازها. گرچه شرح دقیقی از خواص برهم‌کنشی را ارائه نکردیم اما از این خواص استفاده می‌کنیم، زیرا با افزودن پرکننده‌ها می‌توان مواد را استحکام بخشید. مثلاً اضافه کردن (۱) کربن به لاستیک، (۲) ماسه به خاک رس، (۳) ماسه به قیر یا آسفالت، (۴) آرد چوب به پلاستیک یا (۵) رسوهای بین فلزی به فلزات نرم، مقاومت را در برابر تغییر

* این را می‌توان با استفاده از مقداری لحیم ($S_{\text{Fe}} \approx 35 \text{ MPa}$) برای اتصال دو قطعه فولاد به هم نشان داد. اگر اتصال لحیم شده نازک باشد، این اتصال می‌تواند تنش بیش از ۱۷۰ MPa را تحمل کند! اگر چه لحیم ضعیف است ولی تغییر شکل نمی‌دهد زیرا توسط فولاد قویتر متصل به آن نگه‌داشته شده است. اگر اتصال نازک و نازک‌تر شود، احتمال کمتری برای تغییر شکل پلاستیکی در لحیم ضعیف وجود خواهد داشت، بنابراین اتصال حتی قویتر خواهد شد.



شکل ۱۰-۳-۱ استحکام مخلوطها (آردچوب به عنوان پرکننده در رزین فیل-فرم آلدئید)، مخلوط آردچوب و رزین از ترك آنها استحکام بیشتری دارد. آردچوب جلوی لغزش رزین را می‌گیرد، رزین ذرات آردچوب را به هم پیوند می‌دهد.

شکل زیادی می‌کند. اثر افزودن پرکننده بر استحکام (مثال چهارم) را نمودار شکل ۱۰-۳-۱ نشان می‌دهد. گرچه رزین فیل-فرم آلدئید به تنهایی استحکام قابل ملاحظه‌ای دارد، ولی تحت تنش ممکن است دچار شکست برشی شود، و افزودن فاز دیگری به آن مقاومت در برابر تغییر شکل را افزایش می‌دهد. در انتهای دیگر گستره ترکیب استحکام آردچوب (خاک آرد نرم) به تنهایی صفر است زیرا برای نگه داشتن ترك ذرات سلولز به صورت يك جرم همدوس، نیرویی وجود ندارد، افزودن رزین فیل-فرم آلدئید به این ذرات ریز آنها را به هم می‌چسباند. بیشینه استحکام از آمیختن این ترکیبات به دست می‌آید زیرا مخلوط کردن فازها باعث استحکام می‌شود.

ساختار بزرگ‌گراها مثال دیگری از کاربرد مخلوط فازهاست. آشکار است که زیرسازی جاده نمی‌تواند به تنهایی از خاک رس یا از سنگ ریزه یا ماسه باشد، اما مخلوط مناسبی از خاک رس و سنگ ریزه، زیرسازی محکم و قابل استفاده‌ای به وجود می‌آورد (شکل ۱۰-۳-۲).

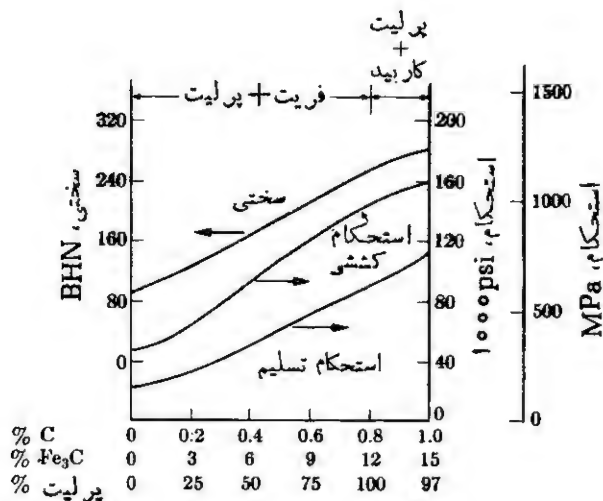


شکل ۱۰-۳-۲ زیرسازی محکم، مخلوط خاک رس و سنگ ریزه بادوامتر از هر کدام از آنهاست.

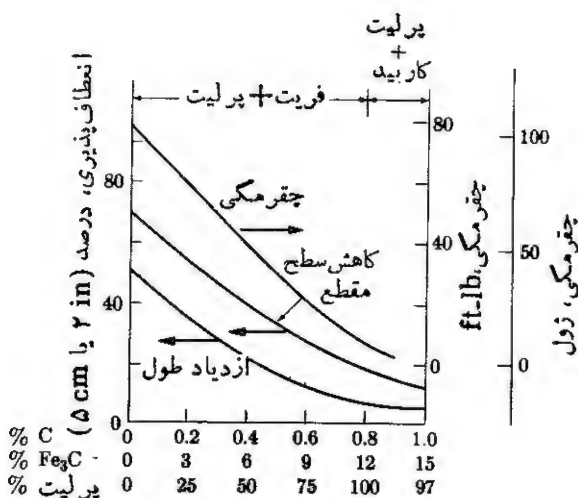
به این ترتیب که سنگ ریزه های سخت، خالکدس را محکم می کنند و خالکدس هم سنگ ریزه ها را به هم می چسباند و آنها را به صورت جرم همدوسی درمی آورد که در برابر بار متمرکز مقاومت می کند.

پرلیت مثال کمی خوبی در مورد ارتباط میکروساختار و خواص مکانیکی است. شکل های ۳-۳-۱۰ و ۴-۳-۱۰ سختی، استحکام، انعطاف پذیری و چقرمگی را بر حسب مقدار کربن نشان می دهند. شکل دوم را می توان بر حسب درصد کاربید، یا بر حسب میکروساختار یعنی درصد پرلیت نشان داد. بنابراین فولاد ۱۰۴۰ شکل ۵-۳-۱۰ که حاوی ۰.۲۵٪ کربن است، ۵۰٪ پرلیت دارد و بقیه آن فریت پرواتکتوئید است. فولاد ۱۰۸۰ حاوی ۱۰۰٪ پرلیت است [شکل ۵-۳-۱۰ (ب)].

فولادهای شکل ۳-۳-۱۰ استحکام بیشتری دارند زیرا لایه های کاربید موجب قید پلاستیکی می شوند و جالوی تغییر شکل فریت انعطاف پذیر را می گیرند. البته مقدار بیشتر کاربید سطح مرز دانه های بین دوفاز را زیاد می کند و بنابراین شیب مثبتی به منحنیهای شکل ۳-۳-۱۰ می دهد. به همین دلیل عکس این وضعیت برای منحنیهای شکل ۴-۳-۱۰ به وجود می آید، به ویژه با وجود مقدار بیشتر کاربید انعطاف نا پذیر تغییر شکل پلاستیکی کمتری قبل از شکست ممکن می شود. این امر نه تنها انعطاف پذیری را کاهش می دهد، بلکه



شکل ۳-۳-۱۰ سختی و استحکام فولادهای ساده تا بکاری شده بر حسب مقدار کربن. میکروساختار این فولادها مطابق با شکل ۵-۳-۱۰ است. سختی را در طرف چپ و استحکام را در طرف راست بخوانید.



شکل ۱۰-۳-۴ چقرمگی و انعطاف پذیری فولادهای ساده تا بکاری شده برحسب مقدار کربن. (به شکل ۱۰-۳-۵ رجوع کنید). فولادهایی که فریت پرواوتکتوئید بیشتری دارند چقرمه تر و انعطاف پذیرترند. انعطاف پذیری را در طرف چپ و چقرمگی را در طرف راست بخوانید.

چقرمگی را نیز کم می کند.*

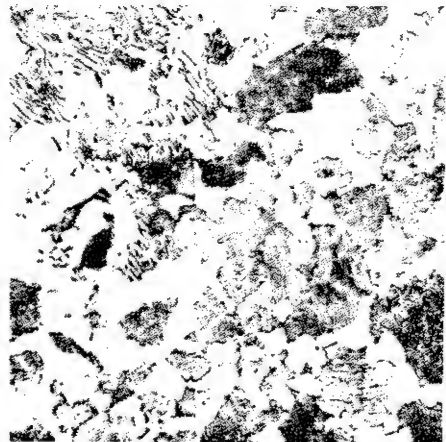
می توانیم تردی (کمبود چقرمگی) فولادها را برحسب افزایش مقدار کربن، براساس میکروساختار نیز شرح دهیم. با افزایش پرلیت [شکل ۱۰-۳-۵ (ب)] مسیر ترد پیوسته ای در طول لایه های کاربید به وجود می آید که ترک می تواند به آسانی در آن مسیر پیشروی کند.

آثار اندازه فاز، قبلاً شرح دادیم که ماسه خیلی نرم نسبت به سنگ ریزه، با درصد حجمی برابر، آسفالت را مستحکمتر می کند. به همین ترتیب ذرات ریز تر کاربید بیشتر از کاربیدهای درشت تر، فریت انعطاف پذیر را استحکام می بخشند (شکل ۱۰-۲-۱). همین نتایج در شکل ۱۰-۳-۶ برای فولادهای حاوی پرلیت درشت و ریز دیده می شود. منظور ما فولادهایی است که لایه های ضخیم تر یا نازکتر فریت و کاربید دارند. همان طور که در شرح واکنشهای

* چقرمگی به حاصل ضرب تنش و کرنش بستگی دارد، و بنابراین به حاصل ضرب استحکام در انعطاف پذیری نیز مربوط می شود. از شکل های ۱۰-۳-۳ و ۱۰-۳-۴ می توان دریافت که کاهش انعطاف پذیری نسبتاً بیشتر از افزایش استحکام است. بنابراین با افزایش کربن کاهش در چقرمگی به وجود می آید.



(ب)

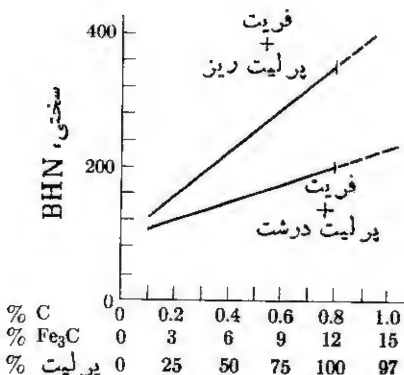


(الف)

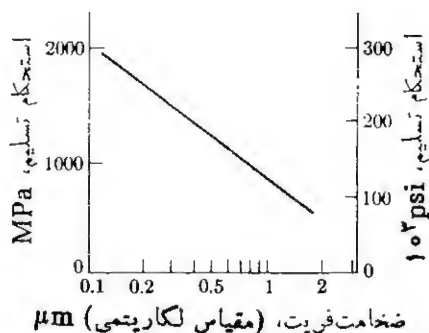
شکل ۱۰-۳-۵ میکروساختار فولادهای پرلیتی ($\times 500$). (الف) ۴۰٪ کربن؛ (ب) ۸۰٪ کربن. در فولاد ۴۰٪ کربن قبل از آنکه واکنش اوتکتوئید، در پرلایت (خاکستری) فریت لایه‌ای به وجود آورد، سطوح وسیعتر فریت (سفید) تشکیل می‌شود. فولاد ۸۰٪ کربن فقط حاوی فریت اوتکتوئید است. (شکلهای ۳-۷-۹ و ۱-۸-۹ را مقایسه کنید.)

اوتکتوئید در بخش ۱۰-۱۱ گفتیم سرد کردن با سرعت زیاد (یا تجزیه استنیت در دمای پایینتر) موجب به وجود آمدن لایه‌های بیشتر و نازکتری می‌شود زیرا نفوذ به فواصل کوتاhtری محدود شده است.

در شکل ۱۰-۳-۷ رابطه کمتری بین ابعاد لایه‌ها و استحکام تسلیم دیده می‌شود. در لایه‌های نازکتر پرلایت ریز، سطح مرزدانه در واحد حجم بیشتر است. بنابراین قید پلاستیکی آن از فریت قابل تغییر شکل معمولی، بیشتر است. شکل ۱۰-۳-۸ سختی فولاد



شکل ۱۰-۳-۶ اثر ابعاد میکروساختار روی سختی فولاد. پرلایت ریزتر و سخت‌تر با سرد کردن سریعتر حاصل شده است.

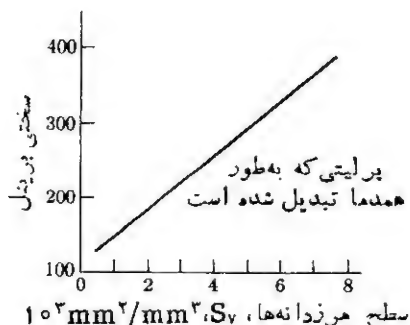


شکل ۷-۳-۱۰ استحکام بر حسب میکرو-ساختار (ضخامت فریت درون پسرلایت). لایه‌های نازکتر، با افزایش لایه‌ها، قید پلاستیکی بیشتری ایجاد می‌کنند. بنا بر این استحکام تسلیم افزایش می‌یابد.

پرلیتی ۱۰۸۰ را به مقدار سطح مرزدانه فریت/کاربید در واحد حجم، مربوط می‌کند. آثار کمی مشابهی در مورد اندازه در شکل ۹-۳-۱۰ دیده می‌شود که در آن زمان و دما باهم در نظر گرفته شده‌اند. سختی مارتنزیت اولیه ($R_C 65$) در مارتنزیت بازپخت شده باقی نمی‌ماند. سرعت به هم آمیختگی که در شکل‌های ۱-۲-۱۰ (الف) و (ب) دیده می‌شود، در دماهای بالا زیاد است. اگر مارتنزیت در $600^\circ C$ بازپخت شود، درشت شدن کاربید در عرض چند ثانیه سختی را تا کمتر از $R_C 50$ پایین می‌آورد. در $400^\circ C$ همان عمل نرم شدن تقریباً یک ساعت طول می‌کشد. در $200^\circ C$ سختی در ساعت اول فقط تا $R_C 60$ افت می‌کند.*

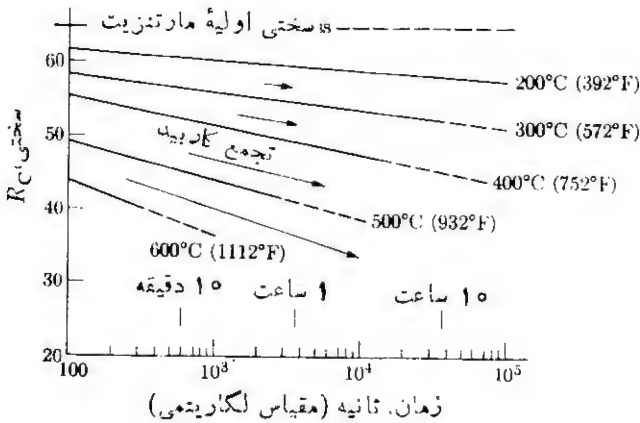
روابط شکل ۹-۳-۱۰ لگاریتمی است زیرا بازپخت شامل حرکت اتمها می‌شود. فعالسازی لازم از نظر گرمایی کنترل می‌شود (مثال ۲-۳-۱۰ را ببینید).

آثار شکل فاز و توزیع آن. در شکل ۲-۲-۱۰، در شکل هندسی فاز کاربید دو میکروساختار تضاد محسوسی دیدیم. هر دو چگالی یکسانی دارند زیرا کسر حجمی فریت و کاربید در آنها یکسان است. ولی این دو، خواص مکانیکی کاملاً متفاوتی دارند (شکل ۱۰-۳-۱۰).



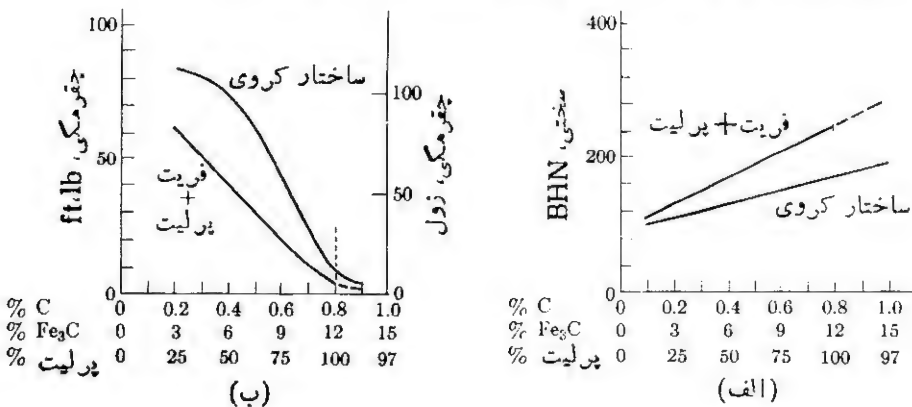
شکل ۸-۳-۱۰ استحکام بر حسب میکروساختار (فولاد پرلیتی ۱۰۸۰). فولاد سخت تر است زیرا سطح مرزدانه‌های فریت-کاربید بیشتر است (لایه‌های نازکتر).

* در $20^\circ C$ بازپخت تقریباً بینهایت آهسته صورت می‌گیرد. باستانشناسان مصنوعات از ابزار قدیمی به دست آورده‌اند که پس از قرن‌ها هنوز ساختار مارتنزیتی دارند.



شکل ۱۰-۳-۹ سختی مارتنزیت بازپخت شده (فولاد ۱۰۸۵، آب داده شده تا سختی $R_c 65$) همین که ذرات کاربید تجمع یا بپند، نواحی فریت بین آنها وسیعتر شده و عمل نرم شدن انجام می‌شود.

کاربیدهای لایه‌ای پرلیت، قید پلاستیکی بیشتری ایجاد می‌کنند و بیشتر از آنکه کاربیدهای کروی در ساختار کسروی جلوی تغییر شکل را می‌گیرند، این لایه‌ها مانع از تغییر شکل می‌شوند. این تضاد که در شکل ۱۰-۳-۱۰ (الف) به صورت اختلاف سختی دیده می‌شود در درجه اول تابع سطح مرز بین فازهاست زیرا فریت مجاور است که در مقابل لغزش مقاومت می‌کند. از آنجا که در دو میکروساختار، کسر حجمی کربید یکسان است، میکروساختار غیر کروی سطح مرزدانه بیشتری در واحد حجم دارد.



شکل ۱۰-۳-۱۰ سختی و چقرمگی بر حسب، شکل کاربید (فولادهای ساده پرلیتی تا بکاری شده). کاربیدها در پرلیت لایه‌ای و در ساختار کروی شبیه به کره‌اند.

ساختار کروی از پرلیت نرمتر و ضعیفتر، ولی چقرمه تر است [شکل ۱۰-۳-۱۵ (ب)].
این مثال دیگری است از آنچه که قبلاً شرح داده شد. در مقایسه با پرلیت، ترک در حال
پیشروی در ساختار کروی، باید از میان زمینه چقرمه فریت بیشتری عبور کند. بنابراین
انرژی بیشتری جذب می‌شود.

مثال ۱۰-۳-۱۰ فولاد اوتکتوئید (۱۰۸۵) حاوی فریت ($\rho = 7.88 \text{ g/cm}^3$) و کاربید
($\rho = 7.6 \text{ g/cm}^3$) است. الف) چگالی فولاد چقدر است؟ ب) نسبت تقریبی ضخامت
لایه‌های فریت t_α به ضخامت لایه‌های کاربید t_c چقدر است؟

حل: مبنا: 100 g فولاد $= 8 \text{ g}$ کربن $+ 92 \text{ g}$ Fe_3C

$$\frac{88 \text{ g } \alpha}{7.88 \text{ g/cm}^3} = 11.17 \text{ cm}^3 \alpha$$

$$\frac{12 \text{ g } \bar{C}}{7.6 \text{ g/cm}^3} = \frac{1.58 \text{ cm}^3 \bar{C}}{12.75 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = \frac{100 \text{ g}}{12.75 \text{ cm}^3} = 7.84 \text{ g/cm}^3 \text{ (یا } 7.84 \text{ Mg/m}^3\text{)} \quad \text{الف)}$$

ب) از آنجا که ابعاد بلند لایه‌های α و \bar{C} اساساً یکسان اند

$$\frac{t_\alpha}{t_{\bar{C}}} = \frac{V_\alpha}{V_{\bar{C}}} = 11.17 / 1.58 = \sim 7$$

مثال ۱۰-۳-۲ داده‌های شکل ۱۰-۳-۹ نشان می‌دهد که 10^4 ثانیه طول می‌کشد تا سختی
مارتنزیتی که در دمای 360°C باز پخت می‌شود از $65 R_C$ به $50 R_C$ برسد و در 290°C
این زمان به 100 ثانیه می‌رسد. بیا در نظر گرفتن رابطه آرنیوس (رابطه ۱۰-۱-۱)، در
 300°C چه مدت طول خواهد کشید؟

حل: با استفاده از رابطه

$$\ln t = C + \frac{B}{T}$$

$$\ln 10^4 = 9.2 = C + \frac{B}{360 + 273}$$

$$\ln 100 = 4.6 = C + \frac{B}{490 + 273}$$

با حل همزمان

$$B = 17100 \text{ K}$$

$$C = -17.82$$

$$\ln t = -17.82 + 17100 / 573$$

$$t = 170000 \text{ SEC} \quad (\text{روز } 2 \sim)$$

توضیح. این محاسبه برای سختیهای بیشتر از تقریباً $3.5 R_C$ ، درحالی که ذرات کاربید هنوز کوچک و زیادند مناسب است.

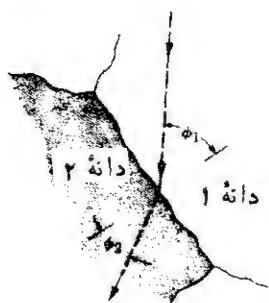
□ ۱۰-۴ میکروساختارها: خواص فیزیکی

در مورد خواص فیزیکی میکروساختارهای چند فاز نمی توان اصل کلی بیان کرد. ولی بیان بعضی روابط مفید به نظر می رسد.

عبود نود در جامدات غیر فلزی تا حد قابل توجهی تحت تأثیر وجود بیش از یک فاز قرار دارد. هر وقت اشعه نوری از مرز دانه ای عبور می کند، اشعه طبق قانون اسنل شکسته می شود

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (10-4-1)$$

در اینجا n شاخص شکست فاز و ϕ زاویه بین اشعه و عمود بر سطح مانع است. از آنجا که دوفاز میکروساختار فقط وقتی که برهم منطبق باشند شاخص شکست یکسانی دارند، در می یابیم که ϕ_1 و ϕ_2 معمولاً متفاوت اند و در نتیجه هر زمانی که نور از مرز فازها عبور کند شکسته می شود (شکل ۱۰-۴-۱). این امر به جای شفافیت موجب پراکندگی و مساتی



شکل ۱۰-۴-۱ نفوذ نور. میکروساختارهایی که فازهای شفاف دارند نور را پراکنده و جذب می کنند، زیرا نور در مرز دانه ها و مرز فازها شکسته می شود. قانون اسنل (رابطه ۱۰-۴-۱) در این مورد به کار می رود؛ ولی وقتی تعداد مرزها بیشتر باشد، شفافیتی در ماده مشاهده نمی شود.

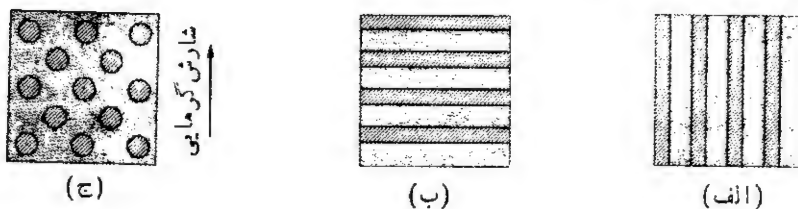
می‌شود. بنابراین موادی که فازهای شفاف دارند مثل آجر و بتن نور را از خود عبور نمی‌دهند زیرا نور پراکنده می‌شود و عاقبت قبل از کامل کردن مسیر خود از میان ماده، از بین می‌رود.

ظرفیت‌های گرمایی، C ، بیشتر فلزات و بسیاری از سرامیک‌ها در دردمای معمولی تقریباً $25 \text{ g/mole}^\circ\text{C}$ (یا $6 \text{ cal/mole}^\circ\text{C}$) است. در محاسبات معمولاً به ظرفیت بر اساس گرم $(\text{J/g}^\circ\text{C})$ یا بر اساس حجم $(\text{J/cm}^3\text{.}^\circ\text{C})$ بیشتر توجه می‌شود زیرا معمولاً حاصل کار به جای مول بر حسب این کمیتها به دست می‌آید. مواد چندفاز از قاعده مخلوط ساده‌ای پیروی می‌کنند

$$c_m = f_1 c_1 + f_2 c_2 + \dots \quad (2-4-15)$$

در این حالت f می‌تواند بر حسب کسر جرمی یا کسر حجمی باشد، به شرط آنکه از داده‌های ظرفیت گرمایی مربوط به آنها استفاده شود.

ضریب انبساط گرمایی مخلوط فازها را نیز توسط قواعد خطی مخلوط تقریب می‌زنیم. این قواعد را می‌توان به منظور برآورد کردن به کار برد؛ ولی باید در نظر داشت که انبساط گرمایی جزئی موجب به وجود آمدن تنشهای داخلی می‌شود به طوری که کرنش کشان وجود خواهد داشت. در محاسبات دقیق باید تصحیحات مربوط به آن انجام شود. رسانندگی الکتریکی و گرمایی هر دو به شکل هندسی میکروساختار بستگی دارند. دوضمیت فوق‌العاده در شکل ۲-۴-۱۵ دیده می‌شود. ضریب رسانندگی گرمایی k را در نظر بگیرید. در شکل ۲-۴-۱۵ (الف) رسانش به موازات ساختار انجام می‌شود؛ بنابراین رابطه زیر به کار می‌رود



شکل ۲-۴-۱۵ رسانندگی بر حسب توزیع فازها (به صورت ایدئال). الف) رسانندگی موازی (رابطه ۲-۴-۱۵)؛ ب) رسانندگی سری (رابطه ۲-۴-۱۵)؛ ج) رسانندگی از میان ماده‌ای که فاز پراکنده دارد (رابطه ۲-۴-۱۵ و ۲-۴-۱۶ در حالتی که دوفاز رسانندگی کاملاً متفاوتی داشته باشند).

* مقدار کلی $25 \text{ J/mole}^\circ\text{C}$ مربوط به ماده‌ای است که خمش پیوندیاجرخش پیوند ندارد. از آنجا که بیشتر پلی‌مرها و بسیاری از شیشه‌ها به این صورت انرژی جذب می‌کنند، ظرفیت گرمایی آنها به همین نسبت بیشتر است. همچنین وقتی دما از T_m کمتر می‌شود، ظرفیت گرمایی از $25 \text{ J/mole}^\circ\text{C}$ پایینتر می‌آید.

$$k_{||} = f_1 k_1 + f_2 k_2 + \dots \quad (3-4-10)$$

ساختار در شکل ۳-۴-۱۰ (ب) به صورت سری است، بنابراین گرما باید به صورت عمود بر لایه‌ها هدایت شود. در این حالت قاعدهٔ عکس مخلوط برای رسانندگی ساختار چندفاز به کار می‌رود

$$\frac{1}{k_{\perp}} = \frac{f_1}{k_1} + \frac{f_2}{k_2} + \dots \quad * (4-4-10)$$

در این دو رابطه، f کسر حجمی است.

میکروساختارهای معمولیتر شامل پراکندگی دویا چندفاز می‌شوند [شکل ۲-۲-۱۰ (ب)]. علاوه بر این، حتی ساختاری لایه‌ای مثل پرلیت جهنگیری تصادفی مجتمه‌های پرلیت را دارد. در درجهٔ اول می‌توان تغییر رسانندگی این میکروساختارها را تقریباً به صورت خطی بر اساس کسر حجمی در نظر گرفت. ولی اگر یکی از دو فاز به صورت پیوسته، c ، باشد و دیگری به صورت پراکنده، d ، بار دیگر اصلاحاتی باید انجام داد. اگر $k_c \ll k_d$

$$k_m \approx \frac{k_c(1 + 2f_d)}{(1 - f_d)} \quad (6-4-10)$$

اگر $k_c \gg k_d$

$$k_m \approx \frac{k_c(1 - f_d)}{(1 + f_d/2)} \quad (7-4-10)$$

در این روابط، f_c و f_d به ترتیب کسر حجمی فازهای پیوسته و پراکنده‌اند. نقش تعیین کنندهٔ فاز پیوسته، حتی اگر کم باشد، آشکار است. اگر رسانندگی آن زیاد باشد، مسیری برای انتقال گرما (یا برق) است. اگر قساز پیوسته عایق باشد، انتقال محدود است، حتی اگر مقدار فاز پراکنده بسیار رسانا در آن زیاد باشد.

* برای رسانندگی الکتریکی σ ، رابطه‌ای که در مورد مجموعهٔ سری به کار می‌رود بدین صورت است

$$\frac{1}{\sigma_{\perp}} = \frac{f_1}{\sigma_1} + \frac{f_2}{\sigma_2} + \dots \quad (الف، ۵-۴-۱۰)$$

یا برای مقاومت ویژهٔ ρ ، رابطه به صورت زیر است

$$\rho_{\perp} = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots \quad (ب، ۵-۴-۱۰)$$

این رابطه به رابطهٔ آشنای مقاومت R برای مقاومت‌های سری، که در محاسبات فیزیک با آن برخورد کرده‌ایم، مربوط می‌شود.

مثال ۱۰-۴-۱: دمای ۱۵۰ گرم لجم $\text{Pb}-20\text{ Sn}$ از 180°C به 20°C می‌رسد. گرمای آزاد شده تقریباً چقدر است؟

حل: مبنا $25\text{ J/mole}\cdot^\circ\text{C}$

$$\text{Pb: } \frac{25\text{ J}}{207.2\text{ g}\cdot^\circ\text{C}} = \frac{0.121\text{ J}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}}$$

$$\text{Sn: } \frac{25\text{ J}}{118.7\text{ g}\cdot^\circ\text{C}} = \frac{0.211\text{ J}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}}$$

از آنجا که به ترتیب ۳۰ و ۱۲۰ گرم سرب و قلع داریم

$$\begin{aligned} \text{گرمای آزاد شده} &= [(0.121)(120) + (0.211)(30)]\text{ J}/^\circ\text{C} [-160^\circ\text{C}] \\ &= -3.33\text{ kJ} \end{aligned}$$

توضیح: ظرفیت گرمایی ($\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$) لجم دوفاز را می‌توان برای 20°C به صورت زیر محاسبه کرد

$$\begin{aligned} c_m &= (0.08)(0.121) + (0.92)(0.211) \\ &= \frac{0.19\text{ J}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

زیرا α و β در آن دما اساساً Sn و Pb خالص اند. در دمای بالاتر مقدار بیشتری α وجود دارد، ولی c_α طبق آن تغییر می‌کند، زیرا حاوی قلع بیشتری است. ▲

مثال ۱۰-۴-۲: پنجاه درصد وزنی گرد SiO_2 (گرد کوآرتز) به عنوان ماده پرکننده به رزین فنل-فرم آلدئید اضافه می‌شود. الف) چگالی مخلوط چقدر است؟ ب) رسانندگی گرمایی آن چقدر است؟

جواب: از پیوست (ج)

$$\rho_{\text{SiO}_2} = 2.65\text{ Mg/m}^3 \quad \rho_{\text{pf}} = 1.3\text{ Mg/m}^3$$

$$k_{\text{SiO}_2} = \frac{0.012\text{ (W/mm}^2\text{)}}{^\circ\text{C/mm}}$$

$$k_{\text{pf}} = \frac{0.00016\text{ (W/mm}^2\text{)}}{^\circ\text{C/mm}}$$

(مبنا: ۱۰۰ گرم، و چگالی به ترتیب 2.65 g/cm^3 و 0.13 g/cm^3)

$$50 \text{ g SiO}_2 = 1878 \text{ cm}^3 \text{ SiO}_2 \quad f_{\text{SiO}_2} = 0.33 \quad (\text{الف})$$

$$50 \text{ g pf} = \frac{3874 \text{ cm}^3 \text{ pf}}{5772 \text{ cm}^3} \quad f_{\text{pf}} = \frac{0.67}{1.0}$$

$$\rho_m = \frac{100 \text{ g}}{5772 \text{ cm}^3} = 1.75 \text{ g/cm}^3$$

یا

$$\rho_m = (0.33)(2.65) + (0.67)(1.3) = 1.75 \text{ g/cm}^3$$

ب) از آنجا که $k_{\text{pf}} \ll k_{\text{SiO}_2}$

$$k_m \approx k_c \left(\frac{1 + 2f_d}{1 - f_d} \right)$$

$$\Delta \quad k_m \approx 0.00016 \left[\frac{1 + 2(0.33)}{1 - 0.33} \right] = \frac{0.0004 (W/mm^2)}{(^{\circ}C/mm)}$$

مرور و بررسی مطالب

خلاصه

تغییر میکرو ساختار هر ماده به واکنشهای فاز جامد آن بستگی دارد. واکنشهای چند شکلی، تبلور مجدد، و رشد دانهها به نفوذ گسترده نیاز ندارند. حل شدن و رسوب کردن شامل دو فاز با ترکیبهای مختلف است و بنابراین برای ادامه یافتن به نفوذ زیادی احتیاج دارد. در عملیات حل شدن، اتمهای جزء کمتر باید نفوذ کنند تا در تمام حلال پراکنده شوند. هنگام رسوب کردن، اتمهای اضافه حل شده باید جدا شوند و فاز جدیدی تشکیل دهند. وقتی واکنش توسط نفوذ صورت می گیرد، زمان واکنش t (یا عکس آن R) را می توان توسط رابطه آرنیوس، $\ln t = C + B(1/K)$ ، به دما مربوط کرد. حتی در این صورت پیشرفت واکنش بسیار پیچیده است. واکنش در آغاز آهسته سپس سریع و در پایان با سرعت کم انجام می شود (شکل ۱۰-۱-۴).

واکنشهای فاز جامدی که به جوانه زنی فاز جدید نیاز دارند، با بالا رفتن میزان فوق سرمایش سریعتر پیشرفت می کنند؛ ولی به زودی به بیشینه سرعت (کو تاhterین زمان) می رسند. در دماهای کمتر، زمان بیشتری لازم است زیرا نفوذ و تغییرات ترکیب بسیار آهسته صورت می گیرد. این امر موجب به وجود آمدن منحنی C برای واکنشهای همدماشده است و پایه ای برای مطالعه (۱) عواملی که بر سرعت واکنش اثر می گذارند و (۲) میکرو ساختارهای حاصل است. بالای زانوی منحنی C ، واکنش معمولاً در مرز دانهها جوانه

می‌زند و واکنشگرها به این مکانها نفوذ می‌کنند. در دماهای زیرخم منحنی C، جوانه‌زنی در میان دانه‌ها به‌صورت پراکنده انجام می‌شود و نفوذ لازم کاهش می‌یابد. واکنش اوتکتوئید شامل سه‌فاز است. در حین سرد کردن معمولاً دو فاز حاصل می‌شود که از مرزدانه شروع و به‌فاز ناپدیدشونده واکنشی می‌رسد. این راه تشکیل پرلیت است. در این حالت نفوذ بسیاری لازم است.

مارتنزیت فازی انتقالی است که به‌صورت میانی بین استنیت و فریت به‌علاوه کاربید $(\alpha + \bar{C})$ تشکیل می‌شود. آب‌دادن باید به‌حدی سریع باشد که استنیت را قبل از آنکه تجزیه معمولی صورت گیرد، تا دمای پایین سرد کند. این فاز سخت در فرایندهای فولاد بیشتر از همه مورد توجه است. وقتی در نهایت به‌فاز پایدارتر $(\alpha + \bar{C})$ تبدیل می‌شود، کاربید توزیع بسیار ریزی در زمینه فریت پیدا می‌کند و میکروساختاری به‌نام مارتنزیت بازپخت شده به‌وجود می‌آید. این فاز اندکی نرمتر از مارتنزیت ولی بسیار چقرمه‌تر از آن است. خواص که به‌طور اصلی به‌مقدار نسبی فازها مربوط می‌شود را می‌توان با قواعد مخلوط شرح داد. گاهی به‌صورت افزایشی در نظر گرفته می‌شوند. سایر خواص پیچیده‌ترند، زیرا رفتار یک فاز تحت تأثیر فازهای مجاور آن قرار می‌گیرد. می‌توانیم اثرات کیفی مقدار فاز، اندازه فاز و شکل فاز و توزیع آن را با آزمایش خواص فولادهای تسبکاری شده مختلف مشاهده کنیم (شکلهای ۱۰-۳-۳ تا ۱۰-۳-۱۰).

سؤالات تشریحی

۱. کدامیک از واکنشهای چند شکلی زیر به‌کمترین انرژی فعالسازی نیاز خواهد داشت؟ کدامیک به‌بیشترین انرژی نیاز دارد؟ چرا؟ الف) $BccFe \rightarrow fccFe$ ، ب) الماس \rightarrow گرافیت؛ ج) $BaTiO_3$ راست و چپ $BaTiO_3$ مکعبی.
۲. برنج تابکاری شده‌ای گرم می‌شود تا اندازه متوسط دانه‌های آن به ۱ mm برسد. نمونه دیگری از همین برنج ۵٪ سردکاری می‌شود. به‌همان مدت در همان دما گرم می‌شود. اندازه متوسط دانه‌ها ۱۰ mm است نمونه سومی ۲۰٪ کار سرد می‌شود. اندازه دانه‌های آن پس از عملیات گرمایی مشابهی ۳ mm است. دلایل منطقی این نتایج را بنویسید.
۳. مسی که تغییر شکل بسیاری یافته $(CW > 80\%)$ در دمای پایین‌تر از مسی که اندکی تغییر شکل یافته $(CW < 20\%)$ تبلور مجدد می‌یابد. چرا؟
۴. با مراجعه به پاراگراف ۲ بخش ۱۰-۱، بیان کنید که چگونه سرعت واکنشها تحت تأثیر جنبه‌هایی که در هر مورد گفته شده است قرار می‌گیرد؟
۵. رسوب در حالت جامد را برای دانشجویی که شیمی دانشگاهی را گذرانده ولی این درس را نگرفته است شرح دهید.
۶. سه منحنی شکل ۱۰-۱-۵ را برای هم‌کلاسی خود شرح دهید.
۷. چرا واکنشهای اوتکتوئید معمولاً بیشتر از واکنشهای چند شکلی به‌زمان نیاز دارند؟
۸. چرا برای تشکیل پرلیت از استنیت به‌زمان نیاز است؟

۹. در دمای 500°C استنیت در زمان کمتری تجزیه و به $(\alpha + \bar{C})$ تبدیل می شود تا در دمای 700°C یا 300°C دلایلی بر اساس شکل ۱۰-۷ ارائه دهید.
۱۰. چرا مارتنزیت بیشتر از فریت در مقابل لغزش مقاومت می کند؟
۱۱. به زبان خود شرح دهید که چرا تشکیل مارتنزیت به زمان بستگی ندارد.
۱۲. اگر درصد وزنی کربن ۰.۵ باشد، ساختار bcc مارتنزیت در هر سلول واحد حاوی دو اتم آهن و در آن $c = 0.291\text{ nm}$ و $a = 0.285\text{ nm}$ است. مکانهای درون سلول واحد را که در آنها اتمهای کربن می توانند با کمترین کرنش وجود داشته باشند معین کنید.
۱۳. رابطه ۱۰-۷ همان طور که نوشته شده برگشت ناپذیر است. تحت چه شرایطی استنیت می تواند از $(\alpha + \bar{C})$ یا از M مجدداً تشکیل شود؟ (یادداشت: برگشت مستقیم $(\alpha + \bar{C})$ به M هرگز مشاهده نمی شود یا انتظار آن نمی رود. چرا؟)
۱۴. چرا Fe_3C به فریت استحکام می بخشد، حتی اگر کاربید به حدی ترد باشد که «مثل شیشه بشکند»؟
۱۵. چرا پرلایت ریز بیشتر از پرلایت درشت استحکام دارد؟
۱۶. خواص مشترک پرلایت و ساختار کروی (شکل ۱۰-۲۰) را ذکر کنید؛ خواص متفاوت آنها را ذکر کنید. دلایل انتخاب خود را شرح دهید.
۱۷. ساختارهای زیر را با هم مقایسه کنید. الف) پرلایت؛ ب) مارتنزیت؛ و ج) مارتنزیت باز پخت شده. تفاوت بین فاز و میکروساختار را شرح دهید.
۱۸. رشد ذرات کاربید در شکل ۱۰-۲۰-۱ مستقیماً با مکانیسمهای رشد بخشهای ۶-۷ و ۱۰-۱۰ قابل مقایسه نیست. در عوض به مکانیسمهای حل شدن و رسوب مربوط می شود. علت را شرح دهید.
۱۹. تیغه اهن بری حاوی مقدار کافی کربن است به طوری که سختی آن پس از آب دادن به بیشتر از $R_c 60$ می رسد و قبل از استفاده باز پخت می شود. در نتیجه سختی آن به کمتر از $R_c 60$ می رسد. باز پخت چگونه بر توانایی تیغه فولادی برای بریدن فولاد دیگر اثر می گذارد؟
۲۰. بر اساس اطلاعات این فصل روشی برای به وجود آوردن ساختار کروی پیشنهاد کنید.
۲۱. عرض متوسط لایه فریت را می توان در شکل ۱۰-۲۰-۲ (الف) اندازه گیری کرد. قبل از آنکه استحکام تسلیم آن را از شکل ۱۰-۳-۷ تخمین بزنیم چه اصلاحی باید در این داده ها انجام پذیرد؟
۲۲. آلیاژ $95\text{Al}-5\text{Cu}$ به آهستگی سرد شده به طوری که θ ، شبکه ای در مرز دانه های α تشکیل داده است. بر اساس شکل ۹-۵-۳ و بخشهای ۶-۴ و ۸-۷ خواص مکانیکی مختلف آن را پیش بینی کنید.
۲۳. دلیل منفی بودن شیب منحنیهای شکل ۱۰-۳-۴ را برای همکلاسی خود شرح دهید.
۲۴. برای دانشجوی سال اول شیمی دلیل منفی بودن شیب منحنیهای شکل ۱۰-۳-۹ را

شرح دهید.

۲۵. دلیلی برای استفاده از فرضیه آرنیوس در مثال ۱۰-۳-۲ ارائه دهید.
۲۶. با تائیدهای مفرغی «بدون روغن» توسط تفجوشی گرد مفرغ ساخته می‌شوند تا تخلخلی برابر $107/0 - 207/0$ داشته باشند. چه قاعده مخلوطی، چگالی آنها را به بهترین وجه شرح می‌دهد؟ رسانندگی گرمایی آنها را چگونه چطور؟

مسائل

- ۱۰-۱-۱۰ با مراجعه به مثال ۱۰-۱-۱۰، در چه دمایی اندازه دانه در ۱۵ ساعت از 0.5mm تا 1.0mm رشد می‌کند؟

جواب: 625°C

□ ۱۰-۱-۲ داده‌های شکل ۱۰-۱-۱۰ از رابطه زیر تبعیت می‌کنند

$$\ln \delta = C + n \ln t \quad (\text{یا } \delta \propto t^n)$$

- بدون آنکه به‌دما بستگی داشته باشند و تبعیت از رابطه فوق تا وقتی است که اندازه دانه‌های δ به اندازه نمونه نزدیک نشود. مقدار نمای رشد دانه n ، برای برنج در شکل ۱۰-۱-۱۰ چقدر است؟

- ۱۰-۱-۳ در شکل ۱۰-۱-۴ موارد زیر را به‌صورت تصویری حل کنید. الف) زمان تبلور مجدد (به‌میزان ۵۰٪) برای این مس در 75°C (167°F)؛ ب) دمای لازم برای گرمکاری، به‌شرط آنکه تبلور مجدد در زمانی که مس از میان غلظتها عبور می‌کند تا ۵۰٪ کامل شده باشد (0.06sec).

جواب:

- الف) 1000min (17hrs) ب) $T = 605\text{K} = 332^\circ\text{C}$ / $T = 0.0165$ (ب) مسئله ۱۰-۱-۳ را از طریق محاسبه حل کنید. (به مثال ۱۰-۶-۲ رجوع کنید.)

- ۱۰-۱-۵ عملیات محلولی آلیاژ $95\text{Al}-5\text{Cu}$ در 550°C انجام شده است و سپس به‌سرعت تا 400°C سرد شده و ۲۴ ساعت در آن دما نگه داشته می‌شود. در این مدت میکروساختاری ایجاد می‌شود که در هر 1mm^2 ذره θ دارد. ذرات θ (CuAl_2) تقریباً کروی و چگالی آنها دو برابر چگالی زمینه κ است. الف) این ذرات تقریباً چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟ ب) اندازه متوسط ذرات چقدر است؟

جواب: الف) $10\mu\text{m}$ ب) $328\mu\text{m}$

- ۱۰-۱-۶ میکروساختاری دارای ذرات کروی β با ابعاد متوسط \bar{d} است، که \bar{d} ۱۰٪ فاصله متوسط \bar{D} بین مراکز ذرات مجاور، است. الف) درصد حجمی β چقدر است؟ ب) نسبت \bar{d}/\bar{D} با β 0.57 چقدر است؟

۷-۱-۱۰ لحیم ۹۰ Pb-۱۰ Sn در ۱۸۵°C نگه داشته شده تا تعادل برقرار شود. اندازه متوسط دانه $۱۰۶\ \mu\text{m}^2$ است. آلیاژ سپس به سرعت تا دمای اتاق سرد شده و در آن رسوب β در داخل دانه‌های اولیه α تشکیل می‌شود. زمینه حاصل در داخل ذرات اولیه α ۹۹ Pb-۱ Sn ($\rho = ۱۳۳\text{ Mg/m}^3$) است و ذرات β (۱۰۰ Sn) با فاصله متوسط $۱\ \mu\text{m}$ از هم قرار دارند. الف) چه تعداد ذره به ازای هر دانه اولیه وجود دارد؟ ب) کسر حجمی β چقدر است؟ ج) تقریباً چنداتم قلع به ازای هر ذره β وجود دارد؟
 جواب: الف) $۱۰^9 \sim$ ؛ ب) $۱۵\ \text{v/o}$ ؛ ج) $۱۰^6 \times ۵ \sim$

۸-۱-۱۰ پس از انجام عملیات محلولی نقره استرلینگ (۷۵ Cu-۲۵ Ag) آن را آب داده، و سپس دوباره تا ۴۰۰°C گرم می‌کنند تا تعادل به دست آید؛ در حالت تعادل حاوی رسوب β (تقریباً به شکل کروی) در زمینه α است. الف) اگر اندازه تعیین کننده d مربوط به ذرات β ، $۱\ \mu\text{m}$ باشد، در هر mm^2 چقدر از آن وجود خواهد داشت؟ اگر $d = ۰.۰۵\ \mu\text{m}$ باشد چطور؟ ب) فاصله متوسط بین ذرات چقدر است؟

۹-۱-۱۰ الف) واکنش اوتکتوئید در سیستم Fe-O (شکل ۹-۵-۵) را مشخص کنید. ب) چه مقدار آهن فلزی در دمای کمتر از اوتکتوئید در محصول دوفازی وجود دارد؟

جواب: ب) $۱۶\ \text{w/o}$

۱۰-۱-۱۰ عملیات محلولی اکسیدی حاوی $۷۵\ \text{w/o}$ آهن و $۲۵\ \text{w/o}$ اکسیژن، در ۱۳۰۰°C (۲۳۷۰°F) انجام شده سپس به آهستگی تا دمای اتاق سرد شده است. واکنشها و میکروساختارهای ممکن را با آنهایی که پس از آهسته سرد کردن فولاد ۱۰۶۰ از ۹۰۰°C (۱۶۵۰°F) به دست می‌آید مقایسه کنید.

۱۱-۱-۱۰ با مراجعه به مسئله ۹-۱-۱۰، نسبت $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ در اکسیدی که ترکیب اوتکتوئید دارد چقدر است؟

جواب: $۱۳\ \text{و}$

۱۲-۱-۱۰ با مراجعه به نمودار Cu-Sn در فصل ۹، واکنشهای (در حین سرد کردن) چهار تبدیل اوتکتوئید را معین و محل آنها را مشخص کنید.

۱۳-۱-۱۰ با مراجعه به سؤال تشریحی ۱۲، چگالی مارتزیتی را که حاوی $۵\ \text{w/o}$ کربن است حساب کنید.

جواب: $۷۷۸۹\ \text{Mg/m}^3$ ($= ۷۷۸۹\ \text{g/cm}^3$)

۱۴-۲-۱۰ آلیاژی از Al-Cu حاوی $۲۵\ \text{v/o}$ θ ($\rho = ۵۵\ \text{Mg/m}^3$) در زمینه κ است که این زمینه اساساً آلومینیم خالص است. چگالی آلیاژ چقدر است؟

جواب: $277 \text{ Mg/m}^3 (= 277 \text{ g/cm}^3)$

۱۰-۲-۲ مارتزیت بازپخت شده شکل ۱۰-۲-۱ و ساختار کروی شکل ۱۰-۲-۴ (ب) ترکیب و ساختار مشابهی (کاریبد کروی شکل در زمینه فریت) دارند. سختی ساختار کروی را با سختی دو محصول موجود در شکل ۱۰-۲-۱ مقایسه کنید. (مثال ۱۰-۲-۱ و توضیحات آن را ببینید.)

۱۰-۲-۳ گرد سیلیس (کوآرتز آسیاب شده نرم، $\rho = 265 \text{ Mg/m}^3$ یا 265 g/cm^3) به عنوان پرکننده برای پلی وینیل کلراید ($\rho = 1.3 \text{ Mg/m}^3$) به کار می رود. الف) چه کسر حجمی برای به وجود آمدن محصولی با چگالی 1.75 Mg/m^3 لازم است؟ ب) درصد وزنی SiO_2 چقدر است؟

جواب: الف) 30 v/o SiO_2 ب) 47 w/o SiO_2

۱۰-۲-۴ چگالی میله فنل فرم آلدئید تقویت شده با شیشه را که در آن مقدار شیشه 15 w/o است محاسبه کنید. (الیاف شیشه مورد استفاده از جنس بروسلیکات است.)

۱۰-۲-۵ چگالی آلیاژ Pb-Sn پس از رسیدن به تعادل در 20°C ، 1000 Mg/m^3 (1000 g/cm^3) است. الف) کسر حجمی β چقدر است؟ ب) درصد Sn چقدر است؟

جواب: الف) $33 \text{ v/o } \beta$ ب) 24 w/o Sn

۱۰-۳-۱ فرض کنید که نمونه ای تصادفی از پرلیت موجود در شکل ۱۰-۳-۴ (الف) در محیطی به وجود آید. سختی آن را بر اساس داده های شکل ۱۰-۳-۸ تخمین بزنید.

جواب: $\sim 160 \text{ BHN}$

۱۰-۳-۲ فولاد 1045 در 800°C (1470°F) استنیتی شده و به سرعت تا تشکیل 100% مارتزیت آب داده شده، سپس به مدت 10 دقیقه در 400°C بازپخت شده است تا 50% به وجود آید. چگالی آن چقدر است؟

۱۰-۳-۳ برای نرم کردن فولاد شکل ۱۰-۳-۹ تا $R_c 60$ باید آن را به مدت تقریباً 20 ثانیه در 300°C یا تقریباً 1500 ثانیه در 200°C نگه داریم. فرض کنید رابطه آرنیوس به کار رود. در 100°C تقریباً چقدر طول خواهد کشید.

جواب: تقریباً 10^6 ثانیه (یا 13 روز)

۱۰-۴-۱ □ برای تبدیل فاز A ($n = 1060$) به فاز B ($n = 1058$)، شعاع نور با چه زاویه ای باید شکسته شود؟ (می توان فرض کرد که مرز فازها با شعاع نور زاویه 45° می سازد.)

جواب: 0.7°

۱۰-۴-۲ ظرفیت گرمایی فلزات خالص (+۹۹) در پیوست (ج) را بر حسب $J/g \cdot ^\circ C$ تخمین بزنید.

۱۰-۴-۳ چگالی CaF_2 ، $3.2 Mg/m^3$ ($= 3.2 g/cm^3$) است. ظرفیت گرمایی آن، بر حسب $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ، چقدر است؟

جواب: تقریباً $3 MJ/m^3 \cdot ^\circ C$

۱۰-۴-۴ ایزادی برشی از کاربید سمانته حاوی $60 v/o TiC$ ($c = 0.08 J/g \cdot ^\circ C$) و $40 v/o$ نیکل است. با استفاده از داده‌های لازم در پیوستها، ظرفیت گرمایی آن را (بر حسب $J/cm^3 \cdot ^\circ C$) تخمین بزنید.

۱۰-۴-۵ رسانندگی گرمایی (طولی) پلاستیک تقویت‌شده مسئله ۱۰-۲-۴ را تخمین بزنید.

جواب: $0.0002 (W/mm^2)/(^\circ C/mm)$

۱۰-۴-۶ حفاظی در برابر تشعشع، با استفاده از گرد سرب ($90 W/o$) به عنوان پرکننده در پلی‌استیرن ساخته شده است. این مخلوط سپس در بالای T_g پلی‌استیرن پرس شده است. الف) کسر حجمی سرب چقدر است؟ ب) چگالی حفاظ چقدر است؟ \square ج) رسانندگی گرمایی آن را تخمین بزنید.

۱۰-۴-۷ مکمی (به ضلع ۲۵ میلی‌متر) با رویهم قراردادن لایه‌هایی از ورق آلومینیم و لاستیک وولکانسی شده (به ترتیب $5 mm$ و $75 mm$ ضخامت)، به‌طور متناوب به‌وجود آمده است. رسانندگی گرمایی این لایه‌ها الف) به موازات و ب) عمود بر ورقها چقدر است؟ (از داده‌های پیوست (ج) استفاده کنید).
جواب:

الف) $0.0002 (W/mm^2)/(^\circ C/mm)$ ب) $0.0009 (W/mm^2)/(^\circ C/mm)$

۱۰-۴-۸ Al_2O_3 $2 v/o$ در داخل آلومینیم به‌صورت ذرات بسیار ریز ($< 0.1 \mu m$) پخش شده ($> 10^9/mm^3$) تا حد قابل‌ملاحظه‌ای استحکام فلز را افزایش می‌دهد. الف) Al_2O_3 چقدر (چند درصد) چگالی را تغییر می‌دهد؟ \square ب) Al_2O_3 چقدر (چند درصد) رسانندگی گرمایی را تغییر می‌دهد؟ رسانندگی الکتریکی را چگونه؟

مواد چندفاز: عملیات گرمایی

چشم‌انداز فصل

از دیرباز صنعتگران دریافته بودند که مواد در اثر گرم شدن و بسته به روشی که پس از آن سرد می‌شوند تغییر می‌کنند. آنان با وجود آنکه نمی‌دانستند دقیقاً در داخل ماده چه رخ می‌دهد، فرایندهای مختلف عملیات گرمایی را نامگذاری کرده بودند. این تغییرات میکروساختاری اکنون شناخته شده است. در نتیجه، ارتباط دادن دو موضوع فرایندهای گرمایی و میکروساختاد به‌ما کمک خواهد کرد زیرا در این صورت بهتر می‌توانیم روشهای کسار را تشریح کنیم و استفاده از آنها را بهینه سازیم. بنابراین می‌توانیم خواص نهایی را بهتر کنترل کنیم. درک تغییرات ساختار داخلی، به فرایندهای جدیدی منجر می‌شود و کاربردهای مهندسی بیشتری برای بسیاری از مواد ایجاد می‌کند.

هدف از مطالعه

۱. تفسیر تغییرات ساختاری که در حین تابکاری مواد مختلف صورت می‌گیرد، و پیش‌بینی تغییرات حاصل از آن در خواص.

۲. ارتباط دادن مراحل عملیات گرمایی پیرسختی (رسوب سختی) و فرآیند سازی (الف) به حدحلایت نمودارهای فاز، و (ب) به تغییرات میکروساختاری رشد و گسترش ذرات.

۳. پیش‌بینی زمان لازم برای پیرسختی با استفاده از محاسبات آرنیوس.

۴. درک نمودارهای تبدیل همدمای فولاد به طوری که بتوانید (الف) از آنها برای پیش‌بینی سرعت واکنشها استفاده کنید، (ب) تغییرات را نسبت به تغییر میزان کربن، عناصر آلیاژی افزوده شده، و اندازه دانه پیش‌بینی کنید، و (ج) سرعتهای بحرانی سرد کردن را که موجب ایجاد مسارتزیت تنها یا عدم ایجاد آن می‌شوند تفسیر کنید.

۵. ارتباط دادن فرایندهای عملیات فولاد تجارتي به مجموعه‌های زمان-دما-تبدیل.

۶. استفاده از منحنیهای سختی‌پذیری برای تخمین مقادیر سختی محصولات فولادی مهم، و درک علت تفاوت بین منحنیهای سختی‌پذیری.

۱-۱۱ فرایندهای تابکاری

صنعتگران در گرم کردن بعضی مواد تا دماهای بالا که پس از آن معمولاً فلز به آهستگی سرد می‌شود (برخلاف آب‌دادن) مزایایی یافتند.

فواید تابکاری از ماده‌ای به ماده دیگر تفاوت دارد. شیشه تابکاری و سپس به آهستگی سرد می‌شود تا امکان ترک برداشتن بعدی آن کاهش یابد. تابکاری، سختی محصول شیشه‌ای را تغییر نمی‌دهد. برنج سردکاری شده برای نرم شدن تابکاری می‌شود. اکنون می‌دانیم که برنج در حین تابکاری تبلور مجدد می‌یابد (بخش ۶-۵). البته این عمل در شیشه نمی‌تواند رخ دهد زیرا شیشه هم‌قبل و هم بعد از تابکاری نابلورین است (بخش ۸-۵). تابکاری انعطاف‌پذیری چدن را بالایی بود و اغلب این نتیجه به دست می‌آید که نرمی با انعطاف‌پذیری مترادف است. این امر در مورد برنج که در بالا ذکر شد صحت دارد؛ ولی فولادها و سایر آلیاژهای چندفاز تابکاری شده در این حالت نسبت به عملیات گرمایی دیگر انعطاف‌پذیری کمتری دارند.

تابکاری را نمی‌توان بر حسب خواص حاصل تعریف کرد. بلکه فرایندی است که توسط آن ماده مدت همدیدی گرم و سپس به آهستگی سرد می‌شود. برای پیش‌بینی خواص

ماده حاصل از این عملیات گرمایی باید هر يك از مواد را به طور جداگانه بررسی کرد. طرح زیرهدف و نتیجه چندین عملیات تابکاری معمول را همراه با نیازهای فنی مطرح می کند. «نام تجاری» هر عملیات گرمایی با حروف سیاه نوشته شده است.

تابکاری

ماده: شیشه.

هدف: از بین بردن تنشهای باقیمانده، و اجتناب از ترك گرمایی. (محصول اولیه و نهایی سختی یکسانی دارند.)

دوش: بر حسب ترکیب شیشه فرق می کند زیرا برای از بین رفتن تنش باید به دمای تبدیل شیشه ای، T_g ، نزدیک شد. صنعتگران شیشه، دمایی را انتخاب می کنند که در آن ویسکوزیته η به 10^{12} Pa.s (پواز) 10^{13} برسد. تابکاری در این نقطه بدون آنکه تغییرشکلی ایجاد کند، در عرض چند دقیقه موجب تنشگیری خواهد شد. شیشه باید به آهستگی سرد شود و از نقطه کرنش که در آن ویسکوزیته $10^{13.5}$ Pa.s (پواز) است، بگذرد. سرد کردن آهسته از ایجاد تنشهای گرمایی جدید جلوگیری می کند. زیر دمای نقطه کرنش که در آن ویسکوزیته تا ۳۰ برابر افزایش می یابد، شیشه را می توان سریع سرد کرد، زیرا تنش باقیمانده جدیدی نمی تواند ایجاد شود.

تفصیلات میکروساختاری: هیچ

تنشگیری

مواد: هر نوع فلز و به ویژه فولادها که تغییر حجم آنها در حین تبدیل، به طور نا پیوسته صورت می گیرد.

هدف: از بین بردن تنش باقیمانده (مثل شیشه تابکاری شده)؛ گرچه بیشتر فلزات در معرض ایجاد ترك گرمایی قرار نمی گیرند. اما اگر ماشینکاری تنشها را به طور غیر قرینه از بین ببرد خطر اعوجاج و تاب برداشتن وجود دارد.

دوش: در مورد فولادها، چند دقیقه در 600°C (1100°F)، برای مراکز حجمهای بزرگ باید اضافه مجازی در نظر گرفت تا این دما را به دست آورند.

تفصیلات میکروساختاری: هیچ

تبلور مجدد (یا تابکاری*)

مواد: فلزات سردکاری شده.

هدف: نرم کردن آن با از بین بردن کرنش سختی.

دش: دمایی بین $T_m 300^\circ\text{C}$ تا $T_m 600^\circ\text{C}$ ، انتخاب می‌شود و زمانی مناسب با مراحل تولید، به آن داده می‌شود. تبلور مجدد در فلزات خالص سریعتر از آلیاژها صورت می‌گیرد، در مورد فلزاتی که کرنش ایجاد شده در آنها خیلی بیشتر باشد بسیار سریعتر است (بخش ۶-۶). (ورق و سیم فولادی نباید بالای دمای اوتکوبید تبلور مجدد یابند، مگر آنکه برای آهسته سرد کردن آنها دقت مخصوصی مبذول شود. در غیر این صورت، ممکن است مارتنزیت ترد تشکیل شود.)

تغییرات میکروساختاری: دانه‌های جدید (شکل ۶-۶ و ۱۰-۱-۳).

تابکاری کامل

مواد: فولادها.

هدف: نرم کردن قبل از ماشینکاری.

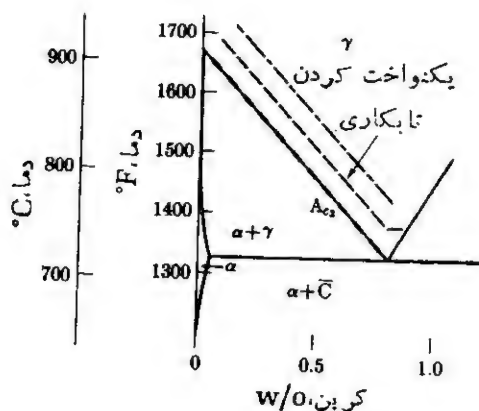
دش: استنیتی کردن در 250°C تا 350°C (500°F) بالای دمای پایداری آخرین قسمت فریت (شکل ۱۱-۱-۱). این کار با سرد کردن در کوره دنبال می‌شود تا استنیت تجزیه و به پرلیت درشت تبدیل شود. محصول به حد کافی نرم است به طوری که فولاد را می‌توان ماشینکاری کرد. فولاد تابکاری شده نسبت به آنچه که در عملیات گرمایی دیگر امکان دارد انعطاف پذیری کمتری دارد، ولی این کار مطلوبی است زیرا موجب بهتر ایجاد شدن تراشه‌ها در حین ماشینکاری می‌شود. (این عمل نسبتاً گرانی است زیرا مدت قابل ملاحظه‌ای کوره را اشغال می‌کند.) میکروساختاد تشکیل شده: پرلیت درشت [شکل ۱۰-۲-۲ (الف)].

کروی کردن

مواد: فولادهای پرکربن مانند یا تا قانها.

هدف: چقرمه کردن فولاد شکننده. در بعضی از فولادها برای داشتن مقاومت در برابر سایش، مقدار کاربید باید زیاد باشد؛ با این حال به صورت پرلیت، چقرمگی بسیار کمی خواهند داشت (شکل ۱۰-۳-۱۰).

* بر حسب تجهیزاتی که به کار می‌رود، این فرایند ممکن است تابکاری جعبه‌ای، تابکاری مداوم، تابکاری مرحله‌ای، و... نامیده شود.



شکل ۱۱-۱۱ تابکاری و یکنواخت کردن (فولادهای کربنی ساده). دمای عملیات گرمایی به مقدار کربن بستگی دارد. برای تابکاری دما چنان است که جسم کاملاً استثنیتی شود. فولاد سپس به آهستگی سرد می‌شود تا پرلیت درشت و محصول نسبتاً نرمی حاصل شود. برای یکنواخت کردن (بخش ۱۱-۲)، فولاد قدری بیشتر گرم می‌شود تا نفوذ آئنی سریع‌تر صورت گیرد و ساختار یکنواخت‌تری به دست آید. ولی گرم کردن زیادی موجب رشد نامطلوب دانه‌ها می‌شود. پس از استثنیتی شدن، فولاد یکنواخت شده در هوا سرد می‌شود تا پرلیت ریز یکنواختی به دست آید. هدف اصلی کم کردن مقدار سختی نیست. [شکل ۱۱-۲-۲ (الف) را ببینید].

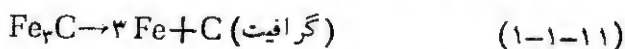
دوش: اگر ساختار اولیه پرلیت باشد، ۱۶-۲۴ ساعت زیر دمای اوتکتوئید (700°C). اگر ساختار اولیه مارتنزیت باشد، ۱-۲ ساعت در آن دما (شکل ۱۰-۲-۱).

میکروساختار تشکیل شده: ساختار کروی [شکل ۱۰-۲-۲ (ب)].

□ چکش‌خوار کردن

ماده: چدن. (بخش ۱۳-۱ را ببینید.)

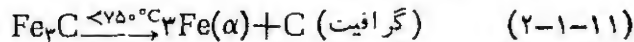
هدف: ایجاد انعطاف پذیری در قطعه ریختگی آهنی. این کار با فراهم آوردن شرایطی برای واکنش زیر صورت می‌گیرد



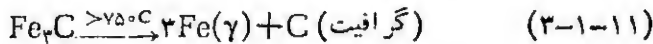
از آنجا که کاربید به ویژه در حضور سیلیسیم کاملاً پایدار نیست، این واکنش صورت می‌گیرد.

دوش: در صورتی که بخواهیم به بیشینه انعطاف پذیری برسیم تابکاری درست زیر

دمای اوتکتوئید انجام می‌شود. از آنجا که



این کار آهن فریتی چکش‌خواری به وجود می‌آورد (شکل ۱۳-۱-۶). اگر دمای تابکاری بالای دمای اوتکتوئید باشد



این محصول پس از آنکه با سرعت معمولی سرد شد به صورت آهن چکش‌خوار پرلیتی درمی‌آید، زیرا استتیت به $(\alpha + \bar{\text{C}})$ تجزیه می‌شود. محصول حاصل نسبت به آنچه از رابطه (۲-۱-۱۱) به دست می‌آید مستحکم‌تر است و انعطاف پذیری کمتری دارد. تغییرات میکروساختاری: خوشه‌های گرافیت تشکیل می‌شود (شکل ۱۳-۱-۶).

مثال ۱-۱-۱۱ عملیات گرمایی مناسب برای بهتر کردن قابلیت ماشینکاری فولاد ۱۰۳۰ را انتخاب کنید.

حل: از آنجا که ترکیبی از انعطاف پذیری کم و سختی کم مورد نیاز است. از تابکاری کامل استفاده کنید.

دما: $855^\circ\text{C} (30^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$ داخل گستره γ کامل).

زمان: به اندازه محصول بستگی دارد.

سرد کردن: سرد کردن در کوره برای ایجاد پرلیت درشت.

توضیح. گرم کردن تادمای بالاتر به سوخت بیشتری نیاز دارد و ممکن است موجب رشد نامطلوب دانه‌ها شود.

▲

۲-۱-۱۱ فرایندهای یکنواخت کردن

در بیشتر موارد محصول یکنواخت، مطلوب است.* در بعضی موارد با عملیات گرمایی مربوط به آن، یکنواختی بیشتری به دست می‌آید. «نام تجاری» این فرایندها همگن کردن، همدماسازی و یکنواخت کردن است.

* البته استثناهایی وجود دارد. چرخ‌دنده کربن‌دهی شده تماماً غیر یکنواخت است تا سطح پر کربن سخت و مقاوم در برابر سایشی روی مغزه فولادی چقرمه‌تر به وجود آید. به همین ترتیب جاده آسفالت شده در مقیاس کوچک غیر یکنواخت است زیرا مخلوطی از ذرات سنگ در زمینه نرمی است که ترکیب کاملاً متفاوتی دارد. حتی در این حالت می‌توان خصوصیات مخلوط خوب را مشخص کرد تا «ناهمگنی یکنواختی» به وجود آید.

همگن کردن (همدماسازی)

مواد: فلزات ریخته شده.

هدف: یکنواخت تر کردن ترکیب. در خـلال انجماد، ترکیب اولین قسمت تشکیل شده با ترکیب کلی آلیاژ یکسان نیست. * این امر برای آلیاژ $96Al-4Cu$ در شکل ۱۱-۲-۱ (الف) نشان می‌دهد. نمودار فازی (شکل ۹-۵-۳) نشان می‌دهد که اولین جامد K که در دمای $650^{\circ}C$ تشکیل می‌شود فقط ۱٪ مس دارد. با کاهش دما به تدریج درصد مس موجود در جامد افزایش می‌یابد. در دمای اوتکتیک، مایع ۳۳٪ مس دارد (و حاوی تقریباً ۵۵٪ مس است).

دوش: دما باید به اندازه کافی بالا باشد و در ضمن مایع تشکیل نشود یا رشد اضافی دانه صورت نگیرد. برخی از آنها در مقیاس اتمی باید مسافت زیادی را نفوذ کنند (حدود ۱۰ میلی‌متر یا تقریباً ۱۰۶ سلول واحد فاصله). بنابراین لازم است فلز تا حد قابل ملاحظه‌ای بالاتر از دمای تبلور مجدد گرم شود تا در مدت زمان معقولی همگن شود.

تغییرات میکروساختاری: همگنی بیشتر، شباهت بیشتر به نمودار فازی.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱-۲-۱ جدایش در هنگام انجماد، و همگن شدن ($96Al-4Cu$). جدانشینی ممکن است به دلیل منجمد شدن سریع به وجود آید، در حالتی که زمان کافی برای نفوذ و رسیدن به تعادل وجود نداشته است (شکل ۹-۵-۳). (الف) آلیاژ ریخته شده بین بلورهای در حال رشد دارای نواحی پر مس است (نواحی تاریک)؛ (ب) همان آلیاژ پس از همدماسازی. مس نفوذ می‌کند تا در هر دانه به طور یکنواخت پخش شود. (این دانه‌ها به طور متفاوتی جهت دار شده‌اند؛ بنابراین نور را به طور متفاوت منعکس می‌کنند و چندین رنگ خاکستری سایه روشن را نشان می‌دهند. در داخل هر دانه همگنی کلی وجود دارد.)

یکنواخت کردن

ماده: فولاد

هدف: ایجاد میکروساختار یکنواخت، و دانه ریز.

دوئل: استینیتی کردن در 50°C تا 60°C (100°F) بالای حداستینیت و سپس سرد کردن در هوا (شکل ۱۱-۱-۱). سرد کردن در هوا از جدانشینی زیاد پرواتکتوئید جلوگیری می‌کند. از آنجا که سختیهای کم مطلوب نیستند، قطعه را از کوره خارج و در هوا سرد می‌کنند تا بتوان قطعه جدیدی در کوره قرار داد.

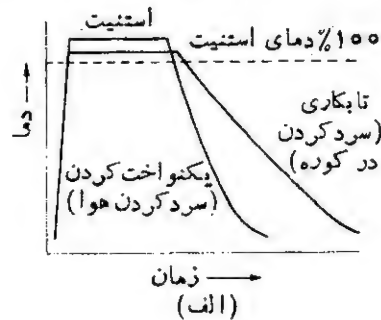
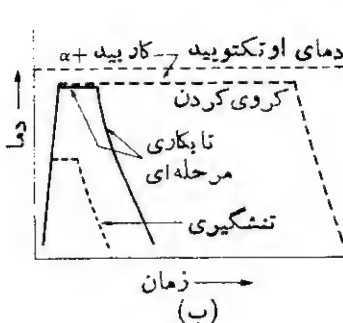
میکروساختار: پرلیت ریز، و بدون فریت حجیم پرواتکتوئیدی. این فرایندها تا آنجا که به فولاد مربوط می‌شوند در شکل ۱۱-۲-۲ خلاصه شده‌اند. دمای عملیات گرمایی بر حسب ترکیب فولاد تغییر می‌کند (شکل‌های ۹-۷-۳ و ۹-۹-۱).

مثال ۱۱-۲-۱: گرم آلیاژ $96\text{Al}-4\text{Cu}$ در 620°C (1150°F) با تشکیل κ و مایع به تعادل می‌رسد، همان‌طور که نمودار فازی نشان می‌دهد. آلیاژ سپس سریعاً تا 550°C (1020°F) سرد می‌شود تا به جامد اولیه فرصت واکنش داده نشود. هنوز یک فاز مایع وجود دارد. الف) ترکیب آن چیست؟ ب) مایع آخری چند گرم وزن دارد؟

حل: در 620°C با استفاده از شکل ۹-۵-۳

مایع: $88\text{Al}-12\text{Cu}$, $\kappa: 98\text{Al}-2\text{Cu}$

$$\text{گرم مایع} = 100\text{g} \left(\frac{98-96}{98-88} \right) = 20$$

در 550°C وقتی فقط ۲۰ گرم مایع واکنش انجام می‌دهد.

شکل ۱۱-۲-۲ فرایندهای عملیات گرمایی فولاد (طرح‌وار). الف) فرایندهای استینیتی کردن؛ ب) فرایندهای زیر اوتکتوئید.



(الف) مایع: $67 \text{ Al} - 33 \text{ Cu}$

$$\text{ب) گرم مایع } 4.6 = g \left(\frac{94.4 - 88}{94.4 - 67} \right) = 20 \text{ وزن مایع}$$

توضیح. در 4.6 گرم مایع نهایی نواحی موضعی با جدانشینی زیاد مس وجود دارد (تا 33%) و حدود 80 گرم از فلز فقط 2% مس دارد. اگر سرد کردن به آهستگی و مرحله به مرحله صورت گیرد، مس محلول در مایع باقیمانده به تدریج غلیظ خواهد شد. ▲

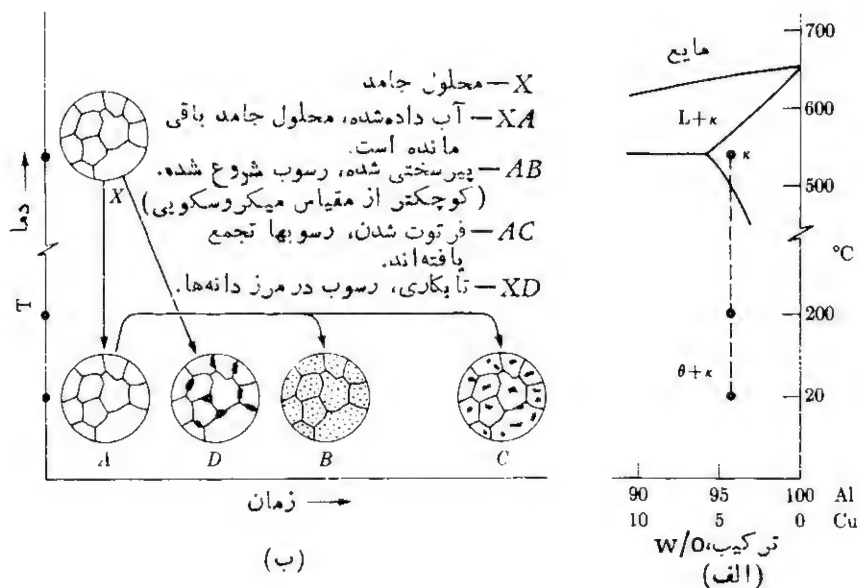
۱-۳ فرایندهای رسوب سختی

رسوب سختی (پیرسختی)، در اولین مراحل تشکیل رسوب از یک محلول جامد فوق اشباع ممکن است افزایش قابل توجهی در سختی به وجود آید (بخش ۱۰-۱ و رابطه ۱۰-۵). در واقع شروع رسوب در شکل ۱۰-۷ با استفاده از این ازدیاد سختی، معین شده است. (این رسوب سختی چون با گذشت زمان ایجاد می شود. پیرسختی نام دارد). شرط اصلی آلیاژی که پیرسختی می شود. آن است که حلالیت با کاهش دما کم شود، به طوری که محلول جامد فوق اشباعی به وجود آید. بسیاری از آلیاژهای فلزی این خاصیت را دارند. فرایند پیرسختی شامل عملیات محلولی (رابطه ۱۰-۴) و به دنبال آن آب دادن است تا محلول جامد فوق اشباع شود. معمولاً آب دادن تا دمایی صورت می گیرد که سرعت رسوب در آن فوق العاده کم باشد. پس از آب دادن، آلیاژ دوباره تا دمای متوسطی* گرم می شود، در این دما پس از مدت زمان متناسبی رسوب شروع می شود. این دو مرحله به صورت XA و AB در شکل ۱۱-۳ و جدول ۱۱-۳ نشان داده شده اند.

خواص بهتر آلیاژ پیرسختی شده (XAB) در جدول ۱۱-۳ را در مقایسه با تابکاری همان آلیاژ (XD)، ببینید. اولی استحکام تسلیمی مساوی چندین برابر ماده تابکاری شده و همزمان انعطاف پذیری بیشتری دارد. در نتیجه، چقرمگی تا حد زیادی با پیرسختی افزایش می یابد. بیشترین انعطاف پذیری وقتی به دست می آید که فقط یک فاز موجود باشد، یعنی پس از عملیات حل کردن (به علاوه آب دادن برای نگهداشتن تک فاز).

مثال جالبی در مورد استفاده از پیرسختی روشی است که در ساخت هواپیما به کار می رود. میخ پرچهای آلومینیومی اگر نرم و انعطاف پذیر باشند بهتر جامی افتند، ولی در این حال استحکام مطلوب را ندارند. بنا بر این تولیدکنندگان، آلیاژی از آلومینیم را انتخاب می کنند که پس از آب دادن و ایجاد محلول جامد فوق اشباع، در دمای اتاق پیرسخت شود. این میخ پرچها وقتی نصب می شوند که هنوز نرم و انعطاف پذیرند. پس از پرچ شدن در محل

* ولی زیر «رانویی» منحنی C (شکل ۱۰-۷)، برای ایجاد رسوب در داخل دانه [شکل ۱۰-۸ (ج)].



شکل ۱۱-۳-۱ فرایند پیرسختی (آلیاژ ۴ Cu-۹۶ Al %). (جدول ۱۱-۳-۱ را ببینید). هنگامی که بیشینه سختی وجود دارد، هنوز رسوبهای تشکیل شده کوچکتر از مقیاس میکروسکوپی اند.

جدول ۱۱-۳-۱ خواص آلیاژ پیرسختی پذیر (۴ Cu-۹۶ Al %)

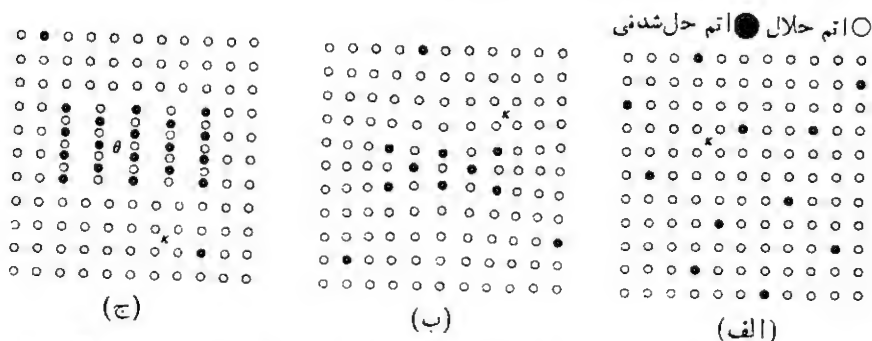
عملیات (شکل ۱۱-۳-۱ را ببینید)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	انعطاف پذیری % در ۵ سانتی متر
XA حل شده (۵۴۰°C) و آب داده شده (۲۵°C)	۲۴۰	۱۰۵	۴۰
XAB پیرسخت شده (۲۰۰°C، ۱ ساعت)	۴۱۵	۳۱۰	۲۰
XAC فرتوت شده	~۱۷۰	~۷۰	~۲۰
XD تابکاری شده (۵۴۰°C)	۱۷۰	۷۰	۱۵

مورد نظر سخت تر خواهند شد. از آنجا که این آلیاژها در دمای اتاق سریعاً سخت می شوند، اگر تقریباً بلافاصله پس از عملیات حل شدن به کار نروند موجب اشکالات عملی برای به تأخیر انداختن فرایند سخت شدن خواهند شد. در این مورد از اثرات شناخته شده دما روی سرعت واکنش استفاده شده است. پس از عملیات حل شدن میخ پرچها در یخچال نگهداری می شوند تا دمای کمتر، فرایند سخت شدن را مدتی به تأخیر اندازد.

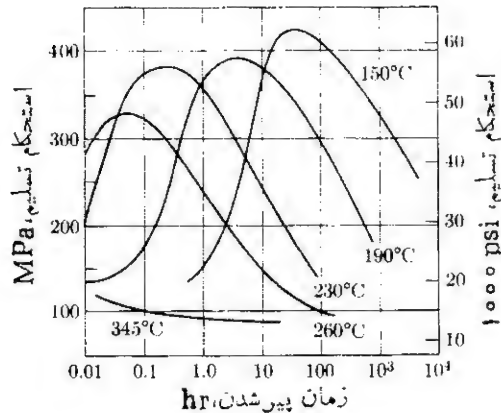
مطالعه بیشتر، جزئیات پدیده پیرسختی را به شرح زیر نشان می دهد. اتمهای فوق اشباع [اتمهای مس در مثال ۱۵-۲ و شکل ۱۱-۳-۱ (ب)] مایل اند به صورتی که به شکل ۱۱-۳-۲ (ب) نشان می دهد، در امتداد صفحات بلوری معینی قرار گیرند، غلظت اتمهای مس (جسم حل شدنی) در این نواحی موجب می شود که در نواحی دیگری حالت فوق اشباع کمتر و ساختار بلوری پایدارتر شود. در این مرحله اتمهای مس هنوز يك فاز كاملاً جدا تشکیل نداده اند و در مرز بین دوساختار همدوسی فواصل اتمی وجود دارد. حرکت نابجاییها در این نواحی دارای اعوجاج با اشکال صورت می گیرد و در نتیجه فلز سخت تر و تحت تنشهای بالا، در برابر تغییر شکل مقاومتر می شود.

فرتوت شدن. ادامه فرایند جدانشینی موضعی به مدت طولانی منجر به تشکیل رسوب واقعی و فرتوت شدن یا نرم شدن می شود. مثلاً در آلیاژ ۹۶٪ آلومینیم و ۴٪ مس، هنگامی ساختار واقعاً پایدار می شود که مس در دمای اتاق به طور کامل از آلومینیم fcc جدا شود. تقریباً تمام مس به صورت $CuAl_2$ درمی آید. [θ در شکل ۱۱-۳-۲ (ج)]. در این حالت آلیاژ تا حد قابل ملاحظه ای نرم خواهد شد زیرا با رشد فاز دوم نواحی وسیعی ایجاد می شوند که در برابر لغزش مقاوم نیستند.

شکل ۱۱-۳-۳ داده های لازم برای پیر شدن و فرتوت شدن آلیاژ آلومینیم تجاری



شکل ۱۱-۳-۲ مکانیسم پیرسختی. (الف) محلول جامد K؛ (ب) پیرسختی شده؛ رسوب θ شروع شده است. چون در این مرحله دوساختار همدوس اند، اطراف رسوب میدان تنشی وجود دارد؛ (ج) فرتوت شده. دو فاز جدا و ناهمدوس K و θ تشکیل شده است. چون تعداد اتمهای حل شونده محدود است، بیشترین مانع برای حرکت نابجاییها در قسمت (ب) وجود دارد.



شکل ۱۱-۳-۳ فروت شدن (آلومینیم T۴-۲۰۱۴). با رشد و بزرگی شدن ذرات رسوب، آلیاژ شروع به نرم شدن می کند و این در دماهای بالا سریعتر اتفاق می افتد.

(۲۰۱۴) را نشان می دهد. سخت شدن اولیه با جمع شدن ذرات رسوب از بین می رود و ماده نرم می شود. آثار دمای پیرشدن عبارت اند از: (۱) در دمای بالاتر رسوب و در نتیجه سخت شدن بسیار سریع شروع می شود، (۲) در دمای بالاتر فروت شدن و در نتیجه نرم شدن سریعتر رخ می دهد. این دو پدیده مجموعاً بر بیشینه سختی آلومینیم اثر می گذارند. در دماهای پایینتر سختی حاصل زیادتر ولی زمان لازم بیشتر است.

سخت شدن موکب. گاهی بهتر است دوروش سخت کردن را باهم به کار ببریم. سردکاری، آلیاژی که قبلاً پیرسختی شده است را بازهم سخت تر می کند. ولی در این فرایند به برخی اشکالات عملی برمیخوریم. پیرسختی مقاومت در برابر لغزش و در نتیجه انرژی لازم برای سردکاری را افزایش می دهد. همچنین انعطاف پذیری را کاهش می دهد و در نتیجه در حین سردکاری پارگی آسانتر صورت می گیرد. یکی از راه حل های ممکن آن است که کار سرد قبل از عملیات رسوب سختی گیرد. در این صورت کار سرد راحت تر انجام شده و واکنش پیرسختی نیز در دمای کمتری صورت می گیرد زیرا نایجاییها به عنوان جوانه برای رسوب به کار می آیند. ولی دمای فرایند پیرکردنی که پس از کار سرد انجام می شود، ممکن است مقداری از کرنش سختی را از بین ببرد و موجب کاهش اندکی در سختی شود. گرچه در این حالت سختی به دست آمده بیشتر از سختی در حالت عکس آن نیست، اما سختی نهایی از آنچه هریک از این دوروش به تنهایی به دست می دهند، بیشتر است (جدول ۱۱-۳-۲).

□ فولادهای کم آلیاژ و پراستحکام (HSLA). اخیراً روشهایی برای افزایش استحکام

جدول ۱۱-۳-۲ استحکام کششی آلیاژ پیرسختی و کرنش سختی شده
(۹۸٪ Cu-۲٪ Be)

۲۴۰ MPa	تابکاری شده در ۸۷۰°C
۵۰۰	عمل حل شدن در ۸۷۰°C و سریعاً سرد شده
۱۲۰۰	فقط پیرسختی شده
۷۴۰	فقط سردکاری شده (۳۷٪)
۱۳۸۰	پیرسختی، و سپس سردکاری شده*
۱۳۴۰	سردکاری و سپس پیرسختی شده

* ترك خورده است.

فولادهای کم آلیاژ ایجاد شده که موجب به وجود آمدن محصورلات پر استحکامتری شده است. گسترش این روشها موجب به وجود آمدن فولادهای ساختمانی با استحکام تسلیم بیش از ۵۰۰ MPa شد؛ این درحالی است که فولادهای ساختمانی قبلی فقط نصف این استحکام را داشتند. استحکام فولادهای HSLA به دلیل کوچک بودن دانه ها و وجود رسوبات ریز پراکنده در فریت است، به عبارت دیگر این رسوبات را می توان با آلیاژهای آلومینیم رسوب سختی شده که قبلاً شرح داده شد، مقایسه کرد. با وجود این، منشأ رسوب در دومورد کاملاً متفاوت است. اگر «کاربیدسازها» از قبیل وانادیم و نیوبیم در فولاد وجود داشته باشند، به همراه ۵۵ ر.ه تا ۲۰ ر.ه٪ کربن هنوز در دماهای نورد گرم می توان تک فاز (استنیت) به دست آورد. بنابراین تیر، لوله، و... را به آسانی می توان تولید کرد. ولی هنگام تجزیه استنیت و تشکیل فریت پروا و تکنوید، کاربیدهای این عناصر آلیاژی رسوب می کنند. متحنی حلالیت برای یک فاز از نوع کاهش یافته است اما تشکیل رسوب بیشتر به این خاطر است که کاربیدهای عناصر آلیاژی در α بیشتر از γ حل می شوند.

فولادهای HSLA برخلاف فولادهای آب داده و بازپخت شده (بخش ۱۱-۵) قابل جوشکاری اند و خواص مکانیکی آنها بدون عملیات گرمایی بعدی حفظ می شود. در نتیجه برای مهندسان طراح ماشینها، سازه های اصلی، و لوله های فشاری بسیار جالب اند.

مثال ۱۱-۳-۱ با استفاده از اطلاعات شکل ۱۱-۳-۳، دمای لازم برای رسیدن به بیشینه سختی این آلیاژ آلومینیم را در ۱۰۰۰۰ ساعت (حدود ۱۴ ماه) برآورد کنید.

حل: با فرض اینکه رابطه آرنیوس (رابطه ۱۰-۱-۱) برقرار باشد، دو دمای ۱۵۰°C (۴۲۳ K) و ۲۶۰°C (۵۳۳ K) را در نظر بگیرید. در ۱۵۰°C که بیشینه سختی

پس از ۳۰ ساعت به دست می آید

$$\ln t_{150} = \ln 30 = C + \frac{B}{423} = 3.72$$

در 260°C که بیشینه سختی بعد از ۳ دقیقه (یا ۵۰۵ ساعت) به دست می آید

$$\ln t_{260} = \ln 0.005 = C + \frac{B}{533} = -3.70$$

از حل دو معادله

$$C = -27.76, \quad B = 13100 \text{ K}$$

$$\ln 10^4 \text{ hr} = 9.21 = -27.76 + \frac{13100}{T}$$

$$T = 356 \text{ K} = 83^{\circ}\text{C}$$

توضیح. رابطه آرنیوس را می توان در 230°C (۵۰۳ K) و 190°C (۴۶۳ K) نیز بررسی کرد

$$\ln t_{230} = -27.76 + \frac{13100}{503} = -1.86, t = 0.02 \text{ hr}$$

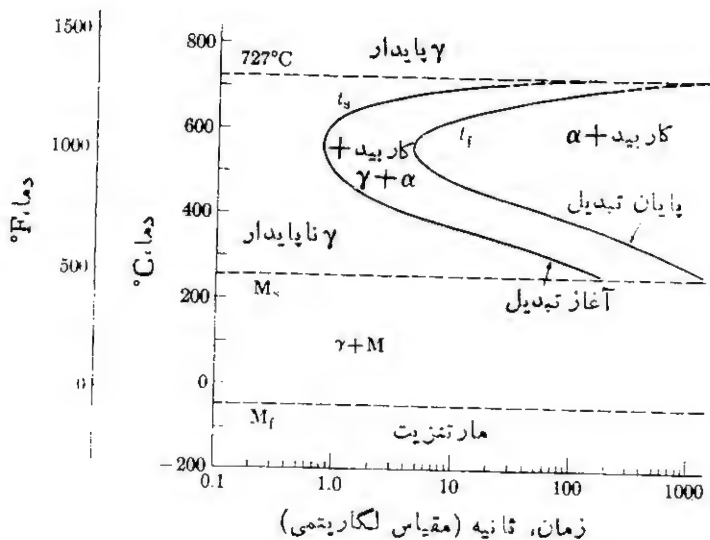
$$\ln t_{190} = -27.76 + \frac{13100}{463} = 0.69, t = 2 \text{ hr}$$

این نتایج با داده های تجربی شکل ۱۱-۳-۳ دقیقاً مطابقت ندارد. ولی معقول است، با وجود این برون یابی در زمانهای طولانیتر و با دمای کمتر هم تقریبی است. ▲

۱-۴ سرعت واکنش $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$

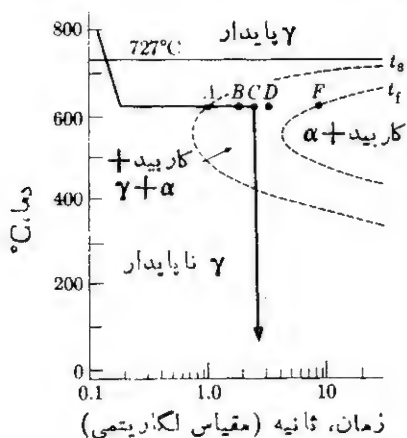
تبدیل همدم. زمان لازم برای تجزیه استنیت به دلیل اهمیت عملی آن به تفصیل مطالعه شده است. شکل ۱۱-۴-۱ داده های زمان-دما را برای این واکنش در فولاد اوتکتوئید (AISI-SAE ۱۰۸۵) نشان می دهد. منحنی سمت چپ t_s زمان لازم برای شروع تجزیه است و منحنی سمت راست t_f زمان لازم برای تکمیل واکنش $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$ را نشان می دهد. این منحنیها نمودار تبدیل همدم یا نمودار I-T نامیده می شوند.* داده های لازم

* این منحنیها، «منحنی C» (به دلیل شکل خاص آن) و به منحنی T-T-T (دما-زمان تبدیل) نیز موسوم اند.



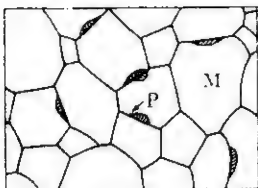
شکل ۱۱-۴-۱ منحنیهای تبدیل همدمما برای تجزیه استنیت (SAE ۱۰۸۰).

برای شکل ۱۱-۴-۱ به ترتیب زیر به دست آمده است. نمونه‌های کوچک فولاد اوتکتوئید در گستره استنیت به مدت کافی چنان گرم شده‌اند که به طور کامل تبدیل به استنیت شوند. این نمونه‌های سیم‌مانند سپس تا دمای کمتری (مثلاً 620°C) آب داده شده و نمونه‌ها را مدت‌های متفاوتی در این دما نگه می‌دارند و سپس آنها را به دمای اتاق آب می‌دهند. (شکل ۱۱-۴-۲). در نمونه‌هایی که کم‌تر از یک ثانیه در 620°C نگه داشته شده بودند تغییر $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$ دیده نشد، و تبدیل کامل به $\alpha + \bar{C}$ کاربید نیز تا ده ثانیه بعد به وقوع نپیوسته بود (شکل‌های ۱۱-۴-۳ تا ۱۱-۴-۵). نظیر این داده‌ها در دماهای دیگر نیز به دست آمد.

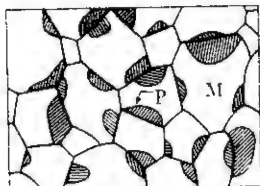


شکل ۱۱-۴-۲ آب دادن منقطع (فولاد اوتکتوئید). این روش برای به دست آوردن منحنیهای تبدیل همدمما به کار می‌رود. آب دادن اولیه در حمام داغ صورت می‌گیرد، سپس قبل از آب دادن تا دمای اتاق، فلز را مدتی در آن نگه می‌دارند.

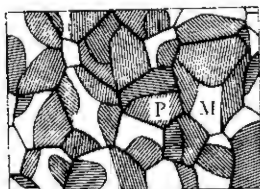
شکل ۱۱-۴-۳ شروع تبدیل همدم‌ها در 620°C (1150°F) ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{کاربید}$). پس از ۱ ثانیه (نقطه A شکل ۱۱-۴-۲) تغییر یافتن به پرلیت، P، آغاز شده است. M فلزی است که به $\alpha + \text{کاربید}$ تبدیل نشده است.



شکل ۱۱-۴-۴ تکمیل ۲۵٪ تبدیل در 620°C (1150°F). (نقطه B در شکل ۱۱-۴-۲).



شکل ۱۱-۴-۵ تکمیل ۷۵٪ تبدیل در 620°C (1150°F). (نقطه D در شکل ۱۱-۴-۲).



و با استفاده از آنها نمودار کاملی مانند شکل ۱۱-۴-۱ رسم شده است. نمودار I-T نشان می‌دهد که تبدیل استنیت چه در دماهای کم و چه در دماهای بالا (نزدیک به اوتکتوید) به آهستگی انجام می‌شود. در دماهای بالاتر تبدیل آهسته است زیرا فوق‌سرمایش به حدی نیست که جوانه‌های فریت و کاربید به آسانی از استنیت قبلی تشکیل شوند. در دمای پایینتر تجزیه استنیت آهسته است زیرا سرعت نفوذ کم است و بنابراین جدا شدن کربن از فریت و تبدیل آن به کاربید به آهستگی صورت می‌گیرد. در دماهای متوسط، جوانه‌زنی به حد کافی سریع است و مهاجرت اتمی به اندازه‌ای تند است که باعث می‌شود واکنش با سرعت شروع و تکمیل شود.

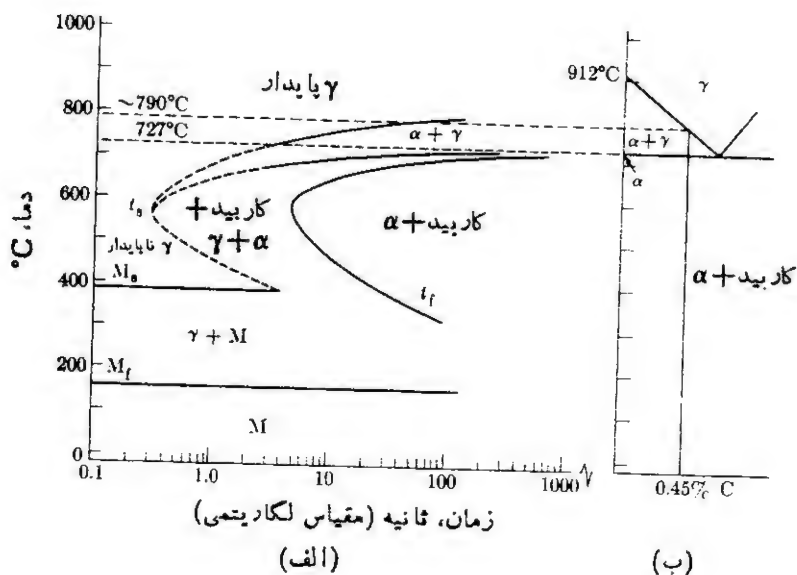
این منحنیها را می‌توان با منحنی رسوب همدم‌ها در شکل ۱۰-۱-۷ مقایسه کرد، که تکه منحنی بود، زیرا فقط نقطه وسط واکنش نشان داده شده بود. می‌توانستیم منحنی دیگری برای ۵۰٪ تبدیل در شکل ۱۱-۴-۱ رسم کنیم که وسط منحنیهای t_1 و t_2 قرار می‌گرفت.

* درون‌یابی آن خطی نیست. واکنش يك چهارم آن (۲۵٪ و ۷۵٪) نزدیک به نقطه ۵۰٪ است زیرا منحنیهای واکنش هلالی شکل‌اند. (شکلهای ۱۰-۱-۲ و ۱۰-۱-۴ را ببینید). پس نقاط B و D شکل ۱۱-۴-۲ که در شکلهای ۱۱-۴-۴ و ۱۱-۴-۵ دیده می‌شوند به C نزدیکترند تا به t_2 و t_8 .

با سرد کردن فوق‌العاده سریع (آب‌دادن شدید)، غالباً امکان رد نشدن از «زائویی» منحنی که آغاز تبدیل را نشان می‌دهد وجود دارد، که در این صورت بدون تشکیل فریت و کاربید فولاد نادمای اتاق سرد می‌شود، زیرا تجزیه به سمت مارتنزیت (شکل ۱۰-۱-۷) منحرف شده است. در حقیقت منظور از آب‌دادن فولاد در عملیات گرمایی معمول، همین است.

مثالی که بررسی شد تبدیل فولاد اوتکتوئید است به شرط آنکه قبل از تشکیل پرلیت $\alpha + \bar{C}$ فریت (یا سمانتیت) از استتیت جدا نشود. شکل ۱۱-۴-۶ (الف) نمودار تبدیل مشابهی را برای فولاد SAE ۱۰۴۵ نشان می‌دهد. که از دوجنبه باشکلی (۱۱-۴-۱) فرق دارد:

۱. بالای دمای اوتکتوئید مقداری فریت از استتیت جدا می‌شود که با توجه به نمودار فازی که در طرف راست شکل ۱۱-۴-۶ رسم شده قابل پیش‌بینی است.
۲. تبدیل همدمای فولادی با ۰.۴۵٪ کسربین قدری سریع‌تر از تبدیل فولاد اوتکتوئید انجام می‌گیرد. مقایسه «زائوییهای» دو منحنی این تفاوت را نشان می‌دهد: در فولادی که کربن بیشتر دارد تبدیل تقریباً در ظرف یک ثانیه شروع می‌شود؛ ولی در فولاد ۰.۴۵٪ کربن واکنش زودتر آغاز می‌شود. در واقع در حالت اخیر واکنش چنان سریع اتفاق



شکل ۱۱-۴-۶ نمودار تبدیل همدما برای فولاد SAE ۱۰۴۵. فازهای پایدار نمودار تعادلی (سمت راست) بلافاصله تشکیل نمی‌شوند، گرچه واکنش تجزیه استتیت در این فولاد سریع‌تر از فولاد اوتکتوئید است (شکل ۱۱-۴-۱).

می‌افتد که سرعت آن را در زانویی منحنی نمی‌توان با روشی که قبلاً ذکر شد (آب دادن منقطع) اندازه گرفت. هر چه درصد کربن فولاد کمتر باشد واکنش سریعتر خواهد بود، زیرا قسمتی از تأخیر در تبدیل به موجب حرکت اتمهای کربن به وجود می‌آید.

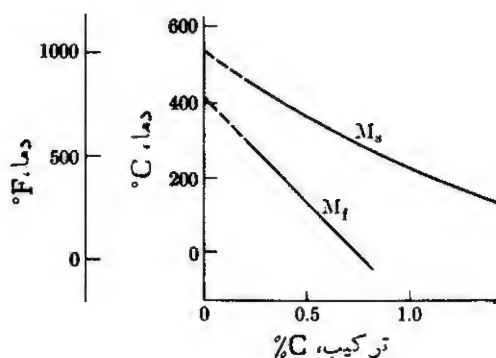
منحنیهای تبدیل همدماً آغاز و پایان واکنش را بر حسب متغیر زمان نشان می‌دهند. بنابراین مثل نمودارهایی که در فصل ۹ دیدیم نمودار تعادلی نیستند. گرچه با نمودارهای تعادلی يك مورد اشتراك دارند. منحنی منتهی‌الیه سمت راست نمودار I-T دوره‌های زمانی طولانی را نشان می‌دهند. بنابراین فازهایی که موجودند باید با فازهایی که نمودار فازی یا تعادلی نشان می‌دهد، جور باشند. مثلاً فازی که طبق نمودار I-T در مورد فولاد ۱۰۴۵ [شکل ۱۱-۴-۶ (الف)] به وجود می‌آید همان است که در مورد فولاد ۰۴۵٪ کربن در نمودار Fe-Fe₃C [شکل ۱۱-۴-۶ (ب)] دیده می‌شود.

همچنین ببینید که نمودار I-T برای مادهٔ بخصوص و واکنش ویژه‌ای است. بنابراین وقتی $\alpha + \bar{C}$ از استنیت تشکیل می‌شود، نمودار I-T دیگر کاربردی ندارد. این امر را می‌توان با واکنش $\gamma \rightarrow \alpha + \bar{C}$ برای فولاد ۱۰۸۰ (شکل ۱۱-۴-۱) نشان داد. اگر استنیت تا 550°C آب داده شده و به مدت ۱۰ ثانیه در این دما بماند واکنش کامل است. حالا اگر دما را تا 300°C کم کنیم نباید انتظار داشته باشیم که منحنیهای رسم شده در شکل ۱۱-۴-۱، باز هم مورد استفاده باشند. خصوصاً $\alpha + \bar{C}$ نمی‌تواند در 300°C به فاز γ برگردد. این خلاف نمودار فازی خواهد بود. تنها راه به دست آوردن دوباره استنیت بالا بردن دما تا ناحیهٔ استنیت شکل ۹-۷-۳ است.

دمای مارتنزیت. قسمت پایین شکل‌های ۱۱-۴-۱ و ۱۱-۴-۶ دماهایی که در آن واکنش مارتنزیت (رابطه ۱۰-۱-۷) شروع می‌شود، M_s و دماهای پایان واکنش، M_f ، را نشان می‌دهد. و این در صورتی است که آب دادن فولاد به قدری سریع صورت گیرد که بدون قطع کردن «زانویی» منحنی C از آن رد شود. از آنجا که در تبدیل استنیت به مارتنزیت نفوذ و خالیتی ندارد، عمل تشکیل مارتنزیت به زمان بستگی ندارد. با این حال M_s و M_f به مقدار کربن موجود بستگی دارند (شکل ۱۱-۴-۷) در نتیجه آب دادن در آب، در مورد آلیاژهای پر کربن، مثل آنهایی که برای فولادهای ابزار استفاده می‌شوند، واکنش $\gamma \rightarrow M$ را کامل نمی‌کند. در نتیجه، این آلیاژها استنیت باقی‌مانده دارند.

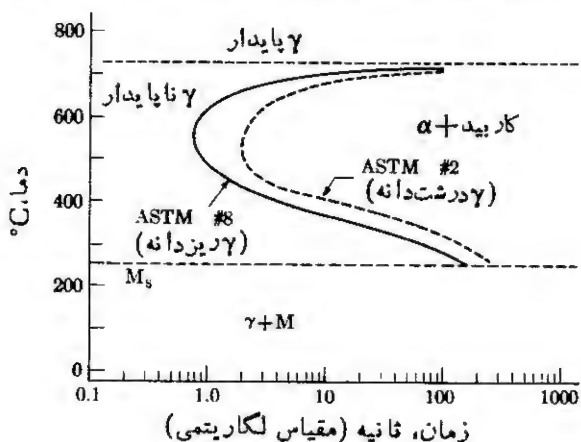
تأخیر در تبدیل استنیت. از بحث قبلی نتیجه می‌شود که دما مشخصاً روی تجزیهٔ همدمای استنیت γ به فریت و کاربید ($\alpha + \bar{C}$) مؤثر است. زمان واکنش غیر از دما به عوامل دیگری نیز بستگی دارد از جمله (۱) اندازهٔ دانهٔ استنیت و (۲) تأخیر آلیاژی.

مطابق با شکل‌های ۱۱-۴-۳ تا ۱۱-۴-۵، تشکیل فریت و کاربید از استنیت در مرز دانه‌ها شروع می‌شود. در فولاد ریز دانه مساحت مرز دانه در واحد حجم، که تجزیه از



شکل ۱۱-۴-۷ دماهای تبدیل مارتنزیتی (فولادهای ساده کربنی) تبدیل در M_s شروع و در M_f کامل می‌شود. بین M_s و M_f استنیت باقیمانده وجود دارد و این به دلیل تنشهای ایجاد شده است.

راه جوانه‌زنی می‌تواند بر روی آن انجام شود، بیشتر از فولاد درشت دانه است. در شکل ۱۱-۴-۸ دو منحنی برای فولاد ریزدانه (عدد اندازه دانه = ۸) و فولاد درشت دانه (عدد اندازه دانه = ۲) رسم شده است. تقریباً در هر دمایی زمان شروع تبدیل در فولاد درشت دانه سه برابر بیشتر است. اثر تأخیر آلیاژی نیز به همان اندازه قابل توجه است. مثلاً تنها ۲۵٪ مولیبدن

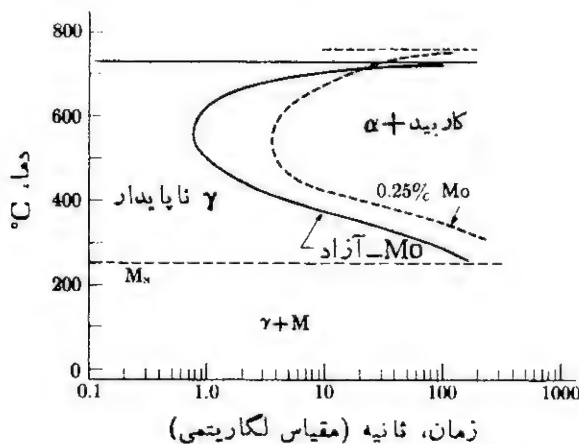


شکل ۱۱-۴-۸ جوانه‌زنی در ریزدانه (فولاد اوتکتوئید). برای فولادهای اوتکتوئید، اثر اندازه دانه‌های استنیت روی شروع تجزیه آن نشان داده شده است. در فولادی که دانه‌های استنیت ریزی دارد، سطح مرز دانه‌ها، که واکنش $\gamma \rightarrow \alpha + \text{C}$ از آنجا شروع می‌شود، بیشتر است.

(شکل ۱۱-۲-۹) شروع تبدیل همدم را با يك فاكتر چهار در دماهای کمتر از 650°C (1200°F) به تأخیر می‌اندازد. دلیل تأخیر آن است که هنگام تجزیه استنیت علاوه بر کربن، اتمهای مولیبدن نیز باید جا به جا شوند. بیشتر Mo وارد کاربید می‌شود. اگر عنصر آلیاژی سیلیسیم باشد، بیشتر آن به درون فریت خواهد رفت. از آنجا که تقریباً تمام عناصر آلیاژی مانند Cr، Ni، Si، Mn، Mo، Ti، W... کندتر از کربن در آهن نفوذ می‌کنند (شکل ۴-۷-۳) منحنیهای تبدیل همدم را برای تمام فولادهای کم آلیاژ (جدول ۹-۹-۱) به طرف راست تغییر مکان می‌دهند. در واقع به راحتی می‌توان بسیاری از فولادهای کم آلیاژ را، بی آنکه «زانویی» منحنی را قطع کنند، تا دمای اتاق سرد کرد به طوری که تمام ساختار به مارتنزیت تبدیل شود.

تبدیل با سرد کردن مداوم (CCT). با استفاده از نمودار تبدیل همدم به راحتی می‌توان اثر دمای ثابت را روی تجزیه استنیت بررسی کرد. ولی در عمل بیشتر با سرد کردن مداوم برخورد می‌کنیم: (۱) قطعه‌ای فولاد داغ از کوره خارج و در هوا سرد می‌شود یا (۲) فولاد در آب سرد می‌شود. در هیچیک از این حالات برای تشکیل $(\alpha + \bar{C})$ قطعه در دمای ثابت نگه داشته نشده است.

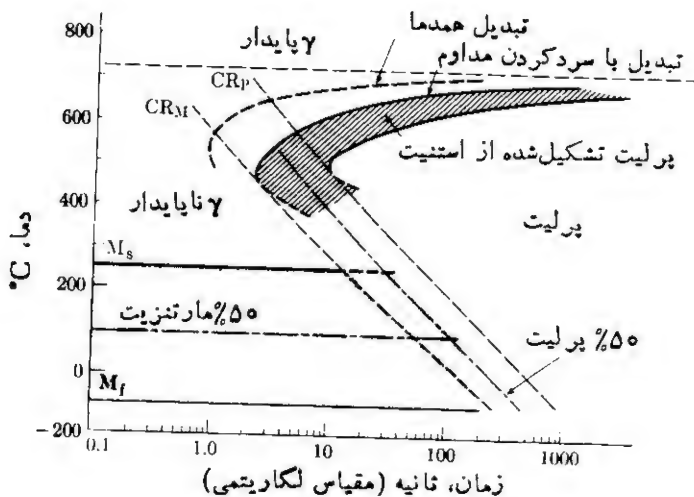
حال تجزیه استنیت با سرد کردن مداوم در سرعت‌های مختلف را در نظر می‌گیریم. آب دادن کامل موجب می‌شود «زانویی» منحنی تبدیل قطع نشود و در نتیجه استنیت به جای تبدیل به پرلیت (یعنی $\alpha + \bar{C}$) به مارتنزیت تبدیل می‌شود. سرد کردن آهسته تشکیل پرلیت را میسر می‌سازد ولی در مقایسه با تبدیل همدم، واکنش پس از زمان طولانیتر (و بنابراین در دمای کمتری) شروع می‌شود، زیرا قسمتی از زمان در دماهای بالاتر که سرعت شروع



شکل ۱۱-۴-۹ تأخیر در تبدیل. مولیبدن، مانند سایر عناصر آلیاژی، شروع تبدیل استنیتی را به تأخیر می‌اندازد.

واکنش کند بوده صبری شده است. بدین ترتیب برای تبدیل با سردکردن مداوم، منحنیهای تبدیل همدمای به طرف راست و پایین تغییر مکان می دهند (شکل ۱۱-۴-۱۰).
در تجزیه استنیت با سردکردن مداوم دو سرعت سردکردن بحرانی وجود دارد که در شکل ۱۱-۴-۱۰ نشان داده شده است. یکی از آنها سرعت سردکردن CR_M است که درست از کنار «زانویی» منحنی رد می شود، و اگر سرعت سردکردن کمی بیشتر به طرف چپ منحنی، یعنی سریعتر باشد، فقط مارتنزیت حاصل خواهد شد. دومین سرعت سردکردن CR_P است که مارتنزیت تولید نمی کند و اگر سرعت سردکردن کمی بیشتر به طرف راست آن یعنی آهسته تر باشد فقط پرلیت به وجود خواهد آمد. برای فولاد اوتکتوئید (Fe ۹۹۲-۰۸C) این دو سرعت بحرانی سردکردن از $700^{\circ}C$ ($1300^{\circ}F$) که در گستره دمای اوتکتوئید است، به ترتیب حدود $140^{\circ}C/sec$ و $35^{\circ}C/sec$ هستند. اگر فولاد عناصر آلیاژی داشته باشد هر دو سرعت آهسته تر خواهد بود، زیرا وجود چنین عناصری، تبدیل $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$ را به تأخیر می اندازد (شکل ۱۱-۴-۹).

مثال ۱۱-۴-۱ سیم فولادی AISI-SAE ۱۰۴۵ در مراحل نشان داده شده، تحت عملیات گرمایی زیر قرار می گیرند. فازهای موجود و ترکیب شیمیایی تقریبی پس از هر



شکل ۱۱-۴-۱۰ تبدیل با سردکردن مداوم (فولاد اوتکتوئید). برای يك فولاد معین زمان و دمای شروع نسبت به منحنی تبدیل همدمای جا به جا می شوند (به شکل ۱۱-۴-۱ رجوع کنید). CR_M کمینه سرعت سردکردن برای ۱۰۰٪ مارتنزیت و CR_P بیشینه سرعت سردکردن برای ۱۰۰٪ پرلیت است.

مرحله را بیان کنید: (علامت # نشان می‌دهد که سیم در آن دما نگه داشته شده تا تعادل برقرار شود).

زمان نگهداشتن

- # سیم (الف): ۱. تا 820°C گرم شده است:
 ۰ ۲. تا 560°C آب داده شده است:
 ۱ دقیقه ۳. در 560°C نگه داشته شده است:
 # ۴. دوباره تا 820°C گرم شده است:
 # ۲۰۱. مانند سیم (الف) (۱) و (۲):
 ۱ ثانیه ۳. در 560°C نگه داشته شده است:
 ۰ ۴. تا 430°C آب داده شده است:
 # سیم (ج): ۱. تا 730°C گرم شده است:
 ۰ ۲. تا 430°C آب داده شده است:
 ۱۰ ثانیه ۳. تا 330°C آب داده شده است:
 # ۴. به مدت طولانی‌تری در 330°C نگه داشته شده است:

حل و توضیح.

سیم (الف)

۱. γ (۹۹.۵۵Fe-۰.۴۵C) ۰.۱
 ۲. همان γ ولی استیت، شبه پایدار است، (شکل ۱۱-۴-۶).
 ۳. α مقدار قابل اغماضی کربن؛ $\bar{C} 7\%$ کربن.
 ۴. γ مثل (۱)
 ۳. γ (۲۵٪ کربن) + $[\alpha]$ (مقدار قابل اغماضی کربن) + $\bar{C} (7\% \text{ کربن})$
 ۴. مانند (۳) زیرا $(\alpha + \bar{C})$ پایتتراز دمای اوتکتوئید به استیت تبدیل نمی‌شود.

- سیم (ج)
 ۱. α (۵۲٪ کربن) + γ (۸٪ کربن)، به نمودار فازی مراجعه کنید.
 ۲. توجه کنید که با سرد شدن، انتظار تغییر α نمی‌رود. استیت ترکیب اوتکتوئید دارد، بنابراین باید برای تبدیل آن به شکل ۱۱-۴-۱ مراجعه کنیم. در زمان صفر، γ به صورت ناپایدار وجود دارد.
 ۳. همان α (۵۲٪ C) و γ ناپایدار (۸٪ C)
 ۴. $\bar{C} + \alpha$ (۷٪ کربن).

مثال ۱۱-۴-۲ نمونه ۱ گرمی نازک ($0.5\text{mm} <$) فولاد ۱۰۴۵ در هنگام فرایند عملیات گرمایی مراحل زیر را طی می کند. (علامت # به معنی آن است که تعادل به دست آمده است.)

زمان نگهداشتن

#	۱. تا دمای 730°C گرم شده است:
۱۰ ثانیه	۲. تا 550°C آب داده شده است:
۵ ثانیه	۳. تا 100°C آب داده شده است:

بعد از هر مرحله چه فازهایی وجود دارد؟ مقدار کربن آنها چقدر است؟ تقریباً چه مقدار از هر فاز موجود است؟

حل و توضیح.

$$(1) \quad 0.02\% \alpha \text{ و } 0.44\% \gamma \text{ (در } 730^{\circ}\text{C})$$

حالا مخلوطی از α و γ داریم. با آب دادن تغییری در فریت به وجود نمی آید (بجز آنکه سردتر می شود). استنیت فولاد ۱۰۸۵ در مقیاس میکروسکوپی است. بنا براین باید از نمودار I-T مربوط به ۱۰۸۵ (شکل ۱۱-۴-۱) استفاده کنیم، نه از نمودار ۱۰۴۵ (شکل ۱۱-۴-۶).

$$(2) \quad 0.02\% \alpha \text{ (در } 730^{\circ}\text{C})$$

$$0.06\% \bar{C} \text{ (در } 730^{\circ}\text{C}) \text{ و } 0.02\% \alpha \text{ (در } 730^{\circ}\text{C}) \rightarrow 0.06\% \bar{C} \text{ و } 0.02\% \alpha$$

$$\alpha = 0.94\% \text{ کل}$$

حالا از شکل ۱۱-۴-۱ استفاده می کنیم زیرا تجزیه γ کامل شده است.

$$(3) \quad 0.02\% \alpha \text{ (در } 730^{\circ}\text{C}) \text{ و } 0.06\% \bar{C} \text{ (در } 730^{\circ}\text{C})$$

آب دادن تا 100°C اجازه نمی دهد که اندک کربن باقی مانده (0.02%) از فریت جدا شود. ▲

□ مثال ۱۱-۴-۳ برای آنکه شروع تبدیل شکل ۱۱-۴-۸ از منحنی سمت چپ (عدد اندازه دانه ۸) به منحنی سمت راست (عدد اندازه دانه ۲) منتقل شود، اندازه دانه با چه نسبتی باید تغییر کند؟ محاسبه را برای سطح مرز دانه ها نیز انجام دهید.

حل: با توجه به رابطه ۴-۴-۲، در بزرگنمایی ۱۰۰× و اندازه دانه ۸ # داریم

$$N = 2^{8-1} = \frac{128}{0.0645 \text{ mm}^2}$$

با $\times 100$ و اندازه دانه #۲

$$N = 2^{2-1} = \frac{2}{0.0645 \text{ mm}^2}$$

$$\frac{N_A}{N_F} = \frac{128}{2} = 64$$

اگر δ یکی از ابعاد خطی دانه را نشان دهد که با عکس ریشه عدد دانه تغییر می کند، داریم

$$\frac{\delta_F}{\delta_A} = \sqrt{\frac{N_A}{N_F}} = \sqrt{64} = 8$$

برای سطح مرزدانه ها، دانه ها را کروی یا مکعبی فرض می کنیم، که در آن

$$= \frac{3}{\delta} = \text{مساحت مرزدانه (به توضیحات توجه کنید)}$$

بنا بر این

$$\frac{B_F}{B_A} = \frac{3/\delta_F}{3/\delta_A} = \frac{1}{8}$$

توضیح. نسبت سطح جانبی به حجم برای مکعب $6/a^2/a^3 = 6/a$ و برای کره $4\pi r^2/(4/3)\pi r^3 = 6/r$ است. مساحت مرزدانه به حجم برابر با $3/\delta$ است، زیرا هر مرز، بین دودانه مجاور، مشترک است. البته دانه ها نه کروی اند و نه مکعبی ولی می توان چیزی بین این دو در نظر گرفت؛ بنا بر این نسبت B/V همان $3/\delta$ باقی می ماند. Δ

۵-۱۱ فرایندهای عملیات فولاد تجارتي

از آنجا که استنیت به راههای مختلفی تجزیه می شود می توان یکی از میکروساختارهای مختلف را برگزید، این میکروساختارها در جدول ۵-۱۱ و شکل ۵-۱۱ خلاصه شده اند. خواص حاصل نیز به طور قابل توجهی تغییر می کنند.

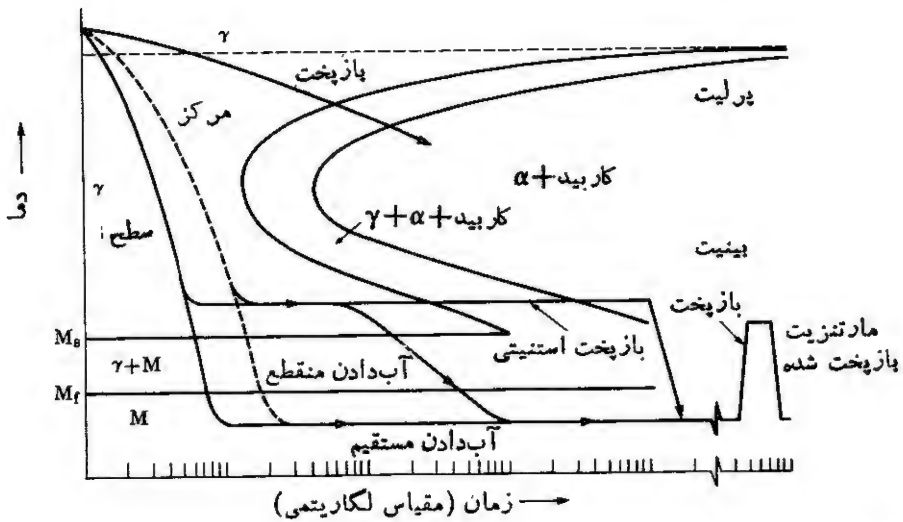
تابکاری. تابکاری قبل از ریختن ۱-۱۱ مورد بحث قرار گرفته است (همچنین شکل ۱۱-۲-۲ (الف) را ببینید). خواص حاصل در شکل های ۱۰-۳-۳ و ۱۰-۳-۴ برای فولادهای ساده دیده می شوند.

جدول ۱۱-۵-۱ فرایندهای تبدیل در فولاد*

فاز(های) حاصل	طرز عمل	هدف	فرایند
$\alpha + \text{کاربید}$	سرد کردن آهسته از گستره γ پایدار	نرم کردن	تابکاری
مارتنزیت**	آب دادن با سرعتی بیشتر از CR_M	سخت کردن	آب دادن
مارتنزیت**	آب دادن و سپس سرد کردن آهسته	سخت کردن بدون ترانخورددگی	آب دادن منقطع
$\alpha + \text{کاربید}$	از M_s تا M_f آب دادن و سپس تبدیل همدا بالا تر از M_s	سخت کردن بدون تشکیل مارتنزیت شکننده	باز پخت استثنیی
$\alpha + \text{کاربید}$	دوباره گرم کردن مارتنزیت	چقرمه کردن (معمولا با کمترین میزان نرم شدن)	باز پخت

* به شکل ۱۱-۵-۱ رجوع کنید.

** فولادهای حاوی مارتنزیت باید با فرایند باز پخت استثنیی چقرمه شوند.



شکل ۱۱-۵-۱ فرایندهای تبدیل. قابکاری: تبدیل عادی کاربید $\gamma \rightarrow \alpha + \text{کاربید}$ انجام می‌شود. آب‌دادن مستقیم: ابتدا در سطح و سپس در مرکز مارتنزیت تشکیل شده و در قطعه تنش زیادی ایجاد می‌شود. آب‌دادن منقطع: چون زمان کافی وجود دارد سطح و مرکز نمونه همزمان تبدیل می‌شوند، و از تنش و ترک‌خوردگی ناشی از آب‌دادن جلوگیری می‌شود. بازپخت: برای کامل شدن تبدیل، پس از آب‌دادن مستقیم و منقطع، عمل بازپخت لازم است. بازپخت استثنایی: آب‌دادن مانع تشکیل پرلیت می‌شود اما بالای M_s هنوز تبدیل کاربید $\gamma \rightarrow \alpha + \text{کاربید}$ انجام می‌شود. میکروساختار حاصل بینیت است.

آب‌دادن. هرگاه سرعت سرد کردن سریعتر از CR_M در شکل ۱۱-۴-۱۵ باشد ($\alpha + \bar{C}$) تشکیل نشده و مارتنزیت سخت (و نسبتاً شکننده) حاصل می‌شود. هدف از آب‌دادن فولادها نیز همین است.

چگالی استیت از مارتنزیت (و همچنین از فریت به علاوه کاربید) بیشتر است و این در هنگام آب‌دادن مستقیم استیت به مارتنزیت اشکال ایجاد می‌کند، زیرا پس از آنکه سطح قطعه سرد و به مارتنزیت تود تبدیل شد مرکز آن سرد شده و هنگام تبدیل انبساط می‌یابد. در این حال اگر ابعاد فولاد بزرگتر از ابعاد ورق یا سیم باشد و به خصوص اگر درصد کربن بیش از ۰٫۵٪ باشد، احتمال ترک‌خوردن وجود دارد. این یکی دیگر از دلایل افزایش عناصر آلیاژی به فولاد است، در فولاد آلیاژی زمان بیشتری برای تشکیل مارتنزیت وجود دارد (شکل ۱۱-۴-۹)، پس فولاد آلیاژی را می‌توان آهسته‌تر سرد کرد تا تغییر دما بین سطح و مرکز کمتر شده و زمان تبدیل آنها به هم نزدیکتر شود. به این ترتیب

می‌توان از تغییر حجم شدید و تشهای حاصل که موجب ترك خوردگی می‌شود، جلوگیری کرد.

آب‌دادن منقطع. با بررسی نمودار تبدیل همدمای می‌توان دریافت که علاوه بر آب‌دادن مستقیم، به‌روش آب‌دادن منقطع نیز می‌توان عمل کرد (آب‌دادن منقطع ممکن است بازپخت مارتنزیتی یا آب‌دادن مارتنزیتی نیز نامیده شود).

در این روش فولاد را آب داده سریعاً از کنار «زانویی» منحنی تبدیل می‌گذرانند تا از تشکیل $(\alpha + \bar{C})$ جلوگیری شود، اما سردکردن بالای M_s قطع می‌شود. بعد سردکردن را با سرعت کمتری از گستره مارتنزیت تادمای متعارفی ادامه می‌دهند به‌طوری که سطح فولاد و مرکز آن کم و بیش همزمان سرد و تبدیل شوند و در نتیجه از ایجاد ترك ناشی از آب‌دادن جلوگیری شود. در این دماهای پایین می‌توان سردکردن را بازهم کندتر انجام داد زیرا با کاهش دما تشکیل مارتنزیت مستقیماً صورت می‌گیرد و تشکیل $(\alpha + \bar{C})$ به‌دلیل کندی زیاد به‌تأخیر می‌افتد.

این فرایند از نقطه‌نظر تولیدی پیچیده‌تر است، زیرا پس از آب‌دادن باید سردکردن را متوقف کرد و بعد با سرعت کمتری ادامه‌داد. در آب‌دادن منقطع نیز مانند آب‌دادن مستقیم، مارتنزیت حاصل می‌شود که باید بازپخت شده چقرمگی لازم در آن ایجاد شود.

بازپخت. مهمترین مشخصه مارتنزیت سختی استثنایی آن است. همچنین مارتنزیت وقتی کربن داشته باشد به‌علت انعطاف‌ناپذیری، ترد است و این تردی، قابل انتظار است زیرا عموماً سختی و انعطاف‌پذیری عکس یکدیگرند. (بامقایسه شکل‌های ۱۰-۳-۳ و ۱۰-۳-۴ معلوم می‌شود که با افزایش مقدار کربن سختی و استحکام زیاد و چقرمگی و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد.) خوشبختانه با بازپخت مارتنزیت افزایش چقرمگی، سریع‌تر از کاهش سختی و استحکام صورت می‌گیرد.*

جدول ۱۱-۵-۲ نشان می‌دهد که فولاد ۴۱۴۰ هم در شرایط تابکاری شده و هم در شرایط کروی شده چقرمه و انعطاف‌پذیر است ولی استحکام چندان زیادی ندارد از طرفی مارتنزیت که بسیار سخت و اساساً محکم است، فاقد چقرمگی است و به‌آسانی ترك می‌خورد.

* این امر قرن‌ها پیش به‌وسیله آزمون و خطا مشخص شده بود ولی اصول آن در طول زندگی متالورژیست‌های امروز کشف شده است.

بازپخت مطمئناً یکی از مهمترین کشفهای طبیعت است که بر پیشرفت تکنولوژیکی پیش‌اثر گذاشته است. می‌توانیم فولادها را تابکاری کنیم تا قابل ماشینکاری شوند. به‌توبه خود این فولادها را می‌توان سخت و بازپخت کرد به‌طوری که بتوانند سایر فولادها را ماشینکاری کنند. روش تکنولوژیکی مفیدی مثل این، برای سایر مواد تا این حد بازده ندارد، زیرا توأمآ سختی و چقرمگی ندارند. یا نرم شده و کند می‌شوند یا از شدت تردی می‌شکنند.

جدول ۱۱-۵-۲ آثار عملیات گرمایی (SAE ۲۱۴۰)

چقرمگی J	استحکام کششی MPa	میکروساختار
۵۵	۶۵۵	تابکاری شده، $(\alpha + \bar{C})$ با کاربید لایه‌ای
۱۱۰	۴۸۰	ساختار کرووی، $(\alpha + \bar{C})$ ، کاربید «کرووی» بزرگ در زمینه فریت
< 3	~ 1400	مارتنزیت، M مارتنزیت بازپخت شده، $(\alpha + \bar{C})$ با کاربید پراکنده در زمینه فریت
۵۵	۱۲۷۵	۱ ساعت در 500°C (930°F)
۱۱۰	۱۰۳۵	۱ ساعت در 600°C (1110°F)

در این صورت مارتنزیت بازپخت شده می‌تواند با عملیات گرمایی مناسب استحکام زیاد و چقرمگی مطلوب را داشته باشد، زیرا در این صورت ذرات پراکنده و سخت کاربید در زمینه چقرمه‌ای از فریت جایگزین مارتنزیت ترد، شده است. (شکل ۱۰-۲-۱). ذرات کاربید مانع حرکت نابجاییها و در نتیجه مانع لغزش می‌شوند و به همان ترتیب که در رسوب سختی بخش (۳-۱۱) دیدیم، استحکام آلیاژ را بالا می‌برند. در همین حال فریت انعطاف‌پذیر در نقاطی که تمرکز تنش وجود دارد (شکل ۸-۷-۲) به‌طور موضعی تغییر شکل می‌یابد تا موجب کند شدن نوک ترک‌هایی شود که در حال ایجاد شدن هستند.*

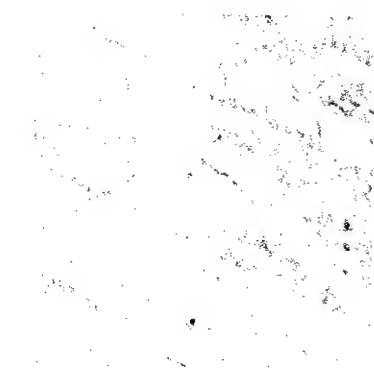
باز پخت استنیتی • آخرین فرایند تبدیلی که برای تجزیه استنیت بررسی می‌کنیم، بازپخت استنیتی است که در آن استنیت در دمای ثابتی درست بالای دمای M_s به فریت و کاربید تبدیل می‌شود. برای این کار باید از تشکیل پرلیت در دماهای بالاتر جلوگیری کرد و بنابراین آب‌دادن لازم است. مزیت این روش آن است که تبدیل به وسیله برش و

* متالورژیست‌ها می‌دانند که گرم کردن تا حدود 500°C (900°F) فولاد را ترد می‌کند زیرا واکنشهای ثانویه‌ای وجود دارند که بین عناصر آلیاژی صورت می‌گیرند. بنابراین اگر بازپخت در دماهای بالاتر انجام شود، لازم است که فولاد از این دما سرد شود. همچنین می‌دانند که چقرمگی دمای انتقالی دارد (بخش ۶-۸)، که با اندازه دانه استنیت و سایر عوامل تغییر می‌کند.

نفوذ توأماً صورت می گیرد تا کار بیدهای ریز در فریت پراکنده شوند و مجموعه ی منجمد و منجمد به وجود آید. همچنین از ترک خوردگی ناشی از آب دادن نیز جلوگیری می شود زیرا واکنش (و تغییر حجم) در دمای ثابت انجام می گیرد. از خیلی جهات ساختار حاصل، یعنی بینیت (شکل ۱۱-۵-۲) شبیه به مارتنزیت (باز پخت شده) است و خواص فیزیکی آن در پسمار نزدیک است.

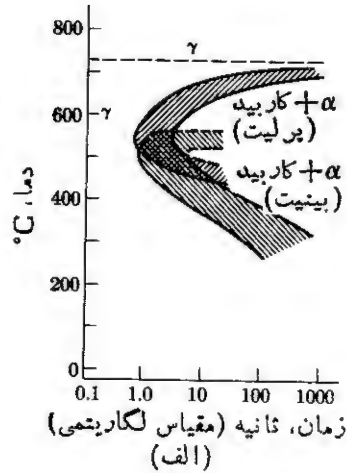
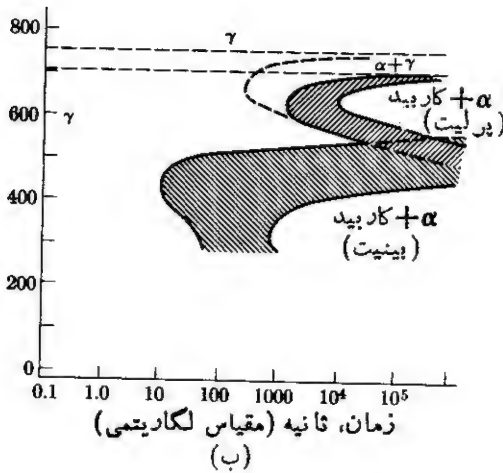
بررسی دقیق فرایندهای تبدیل همدمای $\alpha + \bar{C} \rightarrow \gamma$ در مسود فولاد ۱۰۸۰ نشان می دهد که بالا و پایین «زانویی» منحنی I-T این فرایندها تفاوت دارند. بالای این دما جوانه زنی به مرز دانه های استنیت محدود می شود و رشد $(\alpha + \bar{C})$ به صورت پریلیت در داخل دانه های استنیت اولیه ادامه می یابد. زیر «زانویی» واکنش به سرعت کند می شود به کنده صورت می گیرد؛ ولی فلزی که شدیداً فوق سرد شده در محلهای پسماری کسه در آن عیب وجود دارد در داخل دانه های استنیت C و α جوانه زده و بینیت تولید می کند. منحنی منحنی I-T شکل ۱۱-۴-۱ در واقع دو مجموعه منحنی است که در شکل ۱۱-۵-۳ (الف) دیده می شود. در مورد فولاد ۱۰۸۰ به طور اتفاقی این منحنیها با هم مماس اند. در مورد فولادهای دیگر، همان طور که شکل ۱۱-۵-۳ (ب) برای فولاد ۴۳۴۰ نشان می دهد، مماس می باشد. بالای تقریباً 550°C (برای دو فولاد فوق)، پریلیت در مقایسه با بینیت در زمین کشش تشکیل می شود. پایین آن دما، ابتدا بینیت به وجود می آید. هر دو گستره دما در آن منحنی ایجاد می کنند.

وقتی دو منحنی مماس می شوند [شکل ۱۱-۵-۳ (الف)] امکان به وجود آوردن بینیت



شکل ۱۱-۵-۲ بینیت با بزرگنمایی ۱۱۰۰۰.
این فولاد SAE ۱۰۸۰ استنیتی، و بعد در دمای ثابت 260°C تبدیل شده تا زمینه ای فریتی با کار بیدهای زیر پراکنده در آن به وجود آید. سختی آن ۵۷RC است.

* این الگوی دوتایی میکروساختار مختص فولادها نیست. در واقع این امر ابتدا در ارتباط با رسوب همدم (شکل ۱۰-۱-۸) مطرح شد. بنا بر این می توانیم آن منحنی را به صورت دو منحنی مماس مجدداً رسم کنیم. یکی برای واکنش هرز دانه ها و دیگری برای رسوب درون دانه ها. فرایند پیر سختی XAB (شکل ۱۱-۳-۱) نیز برای استفاده از رسوب درون دانه ها طراحی شده است.



شکل ۱۱-۵-۳ تشکیل پیرلیت و بینیت. (الف) فولاد اوتکتوئید، فولاد ۴۳۴۰ بالای ۵۵۰°C پیرلیت زودتر از بینیت تشکیل می‌شود و پایینتر از ۵۵۰°C (۱۰۰۰°F) بینیت در زمان کمتری به وجود می‌آید.

یاسر کردن مداوم وجود ندارد، زیرا همیشه ابتدا پیرلیت تشکیل می‌شود. ولی فولاد ۴۳۴۰ را می‌توان با سرد کردن مداوم به بینیت تبدیل کرد، زیرا با افزایش عناصر آلیاژی تشکیل پیرلیت بیشتر از بینیت به تأخیر می‌افتد [شکل ۱۱-۵-۳ (ب)].

مثال ۱۱-۵-۱ (الف) قطعه کوچکی از فولاد ۱۰۴۵ تا ۸۵۰°C گرم شده، تا ۶۵۰°C آب داده شده، برای ۵ ثانیه در این دما نگه داشته شده، و سپس تا دمای ۲۰°C آب داده می‌شود. بعد از هر مرحله چه فازهایی حاصل می‌شود؟ (ب) قطعه کوچکی از فولاد ۱۰۸۰ تا ۸۰۰°C گرم شده، تا ۱۰۰°C آب داده شده و دوباره تا ۲۹۰°C گرم شده و به مدت ۱ دقیقه در این دما نگه داشته شده است. پس از هر مرحله چه فازهایی به وجود می‌آیند؟

حل: (الف) در ۸۵۰°C استنیت ناپایدار

پس از ۵ ثانیه در ۶۵۰°C: استنیت ناپایدار + فریت + کاربید

پس از آب دادن تا ۲۰°C: مارتنزیت + فریت + کاربید*

(ب) در ۸۰۰°C استنیت ناپایدار

پس از آب دادن تا ۱۰۰°C: استنیت ناپایدار + مارتنزیت

پس از ۱ دقیقه در ۲۹۰°C: استنیت ناپایدار + مارتنزیت*

* واکنشهای رابطه (۱۰-۱-۷) پایینتر از دمای اوتکتوئید برگشت پذیر نیستند.

هوان چند فاز: عملیات گرمایی ۵۲۹

توضیح. اگر در 290°C زمان کافی داده شود، استنیت و مارتنزیت بدفریت + کاربید تبدیل می شوند.

مثال ۱۱-۵-۲ روی دو میله متع (به قطر ۴ میلی متر) از فولاد ۱۰۸۰ عملیات زیر انجام می شود:

(۲)	(۱)	
775°C	775°C	استنیتی شده:
275°C	275°C	آب داده شده تا:
۴۵ دقیقه	۴۵ ثانیه	نگه داشته شده در 275°C به مدت:
۳۰ ثانیه	۳۰ ثانیه	سرد شده تا 30°C در مدت:

- الف) فاز(های) موجود پس از هر مرحله را مشخص کنید.
 ب) حاصل هر يك از مراحل چه میکروساختاری خواهد داشت؟
 ج) هر يك از این فرایندها چه نام دارند؟

حل:

- میل (۱) الف) استنیت، استنیت ناپایدار، مارتنزیت + (۷)
 ب) مارتنزیت، به علاوه استنیت باقیمانده
 ج) آب دادن منقطع (یا آب دادن مارتنزیتی)
 میل (۲) الف) γ ، γ ناپایدار، $\alpha + \bar{C}$ ، $\alpha + \bar{C}$ ؛
 ب) بینیت؛
 ج) بازپخت مارتنزیتی

توضیح. سختی مارتنزیت در میل (۱) $65R_C$ است؛ ولی برای چقرمه شدن باید بازپخت شود. محصول نهایی مقداری از این سختی را از دست می دهد (شکل ۱۰-۳-۹) وقتی در 275°C (525°F) بینیت تشکیل می شود، سختی آن تقریباً $50R_C$ است؛ لازم نیست که این ساختار بازپخت شود، زیرا پراکندگی ریزی از کاربید در زمینه فریت وجود دارد.

مثال ۱۱-۵-۳ روشی برای عملیات گرمایی بازپخت استنیتی فولادهای زیر پیشنهاد کنید:
 الف) فولاد ۱۰۴۰، ب) فولاد ۴۳۴۰. در مورد مشخصات تولیدی هر يك توضیح دهید.

دوش:

الف) از شکل ۱۱-۴-۶ استنیتی شدن در بالای 800°C (1475°F)؛ آب دادن تا

$^{\circ}\text{C} 425 \sim (^{\circ}\text{F} 800 \sim)$ ؛ نگهداشتن به مدت تقریباً ۱ دقیقه، سرد کردن تا دمای متعارفی.
(ب) از شکل ۱۱-۳ (ب): استیتمی شدن بالای $^{\circ}\text{C} 750 (^{\circ}\text{F} 1380 >)$ ؛ آب دادن تا $^{\circ}\text{C} 325 \sim (^{\circ}\text{F} 620 \sim)$ ؛ نگهداشتن به مدت تقریباً ۱ ساعت، سرد کردن تا دمای متعارفی.

توضیح. ممکن نیست که فولاد را آنقدر سریع سرد کنیم که سرعت آب دادن فولاد 1040 از CR_M بیشتر شود، (بجز در مورد سیم پیانو و تیغهای صورت تراشی). فولاد 4340 برای آنکه منحنی شروع تبدیل را قطع نکند اندکی بیشتر فرصت دارد. از آن مهمتر، بینیت است که چقرمه و نسبتاً سخت است.
فولادهایی که بیشتر از فولاد 4340 عنصر آلیاژی دارند را می توان برای مواردی که زمان بیشتری برای آب دادن لازم است به کار برد. ولی برای آنکه در نهایت بینیت تشکیل شود، مدت بیشتری باید در کوره باقی بمانند. ▲

□ مثال ۱۱-۴ بعد از آب دادن فولاد 1080 هنوز 5% استیت وجود دارد. این استیت باقیمانده به صورت دانه های کوچکی ($\delta = \sim 1 \mu\text{m}$) در زمینه مارتنزیت موجود است. برای آنکه یکی از این دانه های کوچک استیت باقیمانده کاملاً به مارتنزیت تبدیل شود، برچه فشاری در فلز باید غلبه شود؟

حل: برای سادگی، فرض کنید که تغییرات دانه ($\gamma \rightarrow M$) است، و بعد باید فشرده شود و به فضای اولیه در داخل زمینه مارتنزیت صلب باز گردد.

$$\frac{\Delta V}{V} = -0.0018 \text{ (منفی برای فشار)} \quad \text{از مثال ۱۰-۱-۳}$$

$$K = 162700 \text{ MPa} \quad \text{از مثال ۶-۳-۲}$$

$$P_h = K \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad \text{رابطه (۶-۳-۵)}$$

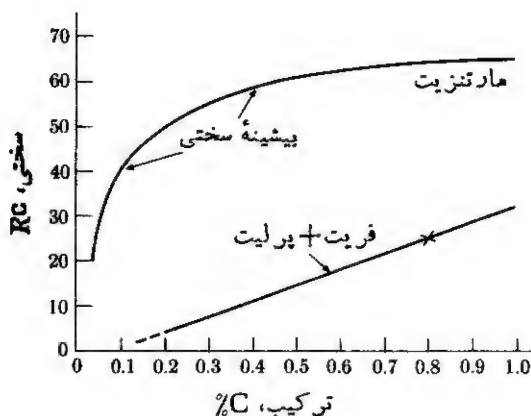
$$= (162700 \text{ MPa})(-0.0018)$$

$$= 2930 \text{ MPa فشار}$$

توضیح. فرض بر آن است که فلز مجاور مطلقاً صلب باشد. در واقع، مقداری از فشار را می گیرد و اندکی آن را کاهش می دهد. حتی در این صورت، تنشهای فشاری برای متوقف کردن واکنش ($\gamma \rightarrow M$) اندکی قبل از تکمیل، کافی اند. ▲

۱۱-۶ سختی پذیری

باید بین سختی و سختی پذیری تمایز قائل شد. سختی مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیکی



شکل ۱۱-۶-۱ بیشینه سختی برحسب مقدار کربن فولادهای ساده. در این شکل بیشینه سختی حاصل از پرلیت با مارتنزیت مقایسه شده است. برای رسیدن به بیشینه سختی باید از واکنش $\gamma \rightarrow \alpha + C$ درحین آب دادن جلوگیری کرد.

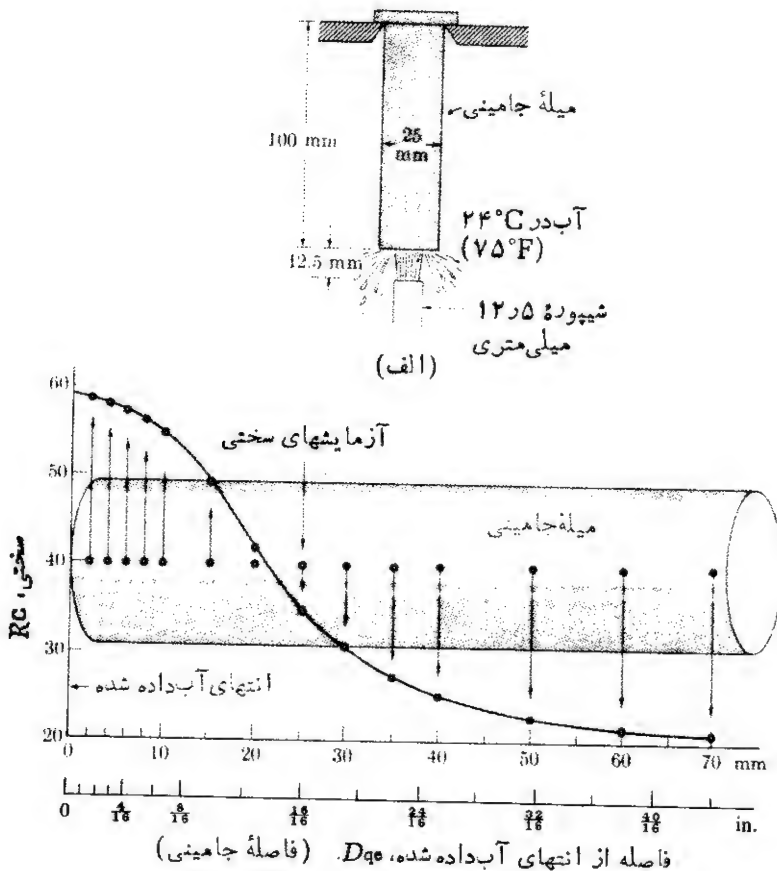
است حال آنکه سختی پذیری نشان دهنده «توانایی» ماده برای سخت شدن است. شکل ۱۱-۶-۱ بیشینه سختی ممکن را برحسب افزایش مقدار کربن فولاد نشان می دهد. این بیشینه در صورتی میسر است که ۱۰۰٪ مارتنزیت تشکیل شده باشد. فولادی که سریعاً از استنیت به «فریت + کاربید» تبدیل شود سختی پذیری کمی دارد، زیرا این فازهای حاصل از تبدیل در دمای بالا جایگزین مارتنزیت شده اند. برعکس فولادی که به آهستگی از استنیت به «فریت + کاربید» تبدیل می شود، سختی پذیری دارد، در چنین فولادی بدون آب دادن خیلی سریع می توان به بیشینه سختی رسید و در مرکز قطعه ای از این فولاد، با وجود آنکه سرعت سرد شدن کمتر است، سختی بیشتری حاصل خواهد شد.

منحنیهای سختی پذیری. برای هر فولادی رابطه مستقیم و استواری بین سختی و سرعت سرد کردن وجود دارد. ولی این رابطه غیر خطی است. علاوه بر این اصول تئوری آنالیز کمی آن پیچیده است.* خوشبختانه امکان استفاده از آزمایش استاندارد شده ای وجود دارد که پیش بینی سختیها را در بسیاری از کاربردها در مدت يك تا دو دقیقه، و مقایسه سختی فولادها را در يك نظر میسر می سازد. این آزمایش، آزمایش آب دادن انتهای جسمی

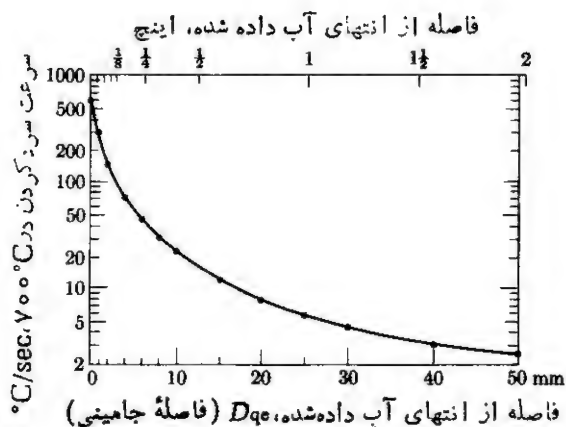
* متغیرهای موجود شامل يك یا چند عامل زیر است. عناصر آلیاژی و یا ناخالصی، اندازه دانه و دمای استنیتی کردن، همچنین از شرح شکل ۱۱-۴-۱۰ به یاد بیاورید که سرعتهای سرد کردن در 700°C محاسبه شده اند. این سرعت در دماهای پایینتر کاهش می یابد و قبل از آنکه کاملاً سرد شود به صفر می رسد.

نام دارد. در این آزمایش استاندارد شده، میله‌ای استوانه‌ای با ابعاد معین گرم می‌شود تا به استنیت تبدیل شود، سپس مطابق با شکل ۱۱-۶-۲ (الف) با جریان آبی که سرعت و فشار معینی دارد از یک انتها آب داده می‌شود. مقادیر سختی در طول میله، در امتداد گرادیان سرعت شدن با سختی سنج را کول اندازه گیری شده و منحنی سختی پذیری رسم می‌شود [شکل ۱۱-۶-۲ (ب)].

انتهای آب داده شده خیلی سریع سرد می‌شود و بنابراین در آن درصد کربن بخصوص، بیشینه سختی ممکن را خواهد یافت. فولادی که پشت سطح آب داده شده قرار دارد آهسته‌تر سرد می‌شود (شکل ۱۱-۶-۳) و در نتیجه سختی آن کمتر خواهد بود [شکل ۱۱-۶-۲ (ب)]. داده‌های مربوط به سرعت سرد شدن شکل ۱۱-۶-۳ برای تمام فولادهای



شکل ۱۱-۶-۲ آزمایش آب دادن انتها (جامینی).



شکل ۱۱-۶-۳ سرعت‌های سرد کردن (در ۷۰۰°C) بر حسب فاصله، D_{qe} ، از انتهای آب داده شده میله جامینی (از آنجا که سرعت سرد کردن پاکم شدن دما به طور پیوسته کاهش می‌یابد، ۷۰۰°C به صورت مرجعی برای مقایسه انتخاب می‌شود. این دما برای بیشتر فولادهای کم آلیاژ تقریباً دمای اوتکتوئید است و بنا بر این برای واکنش $\gamma - \alpha + C$ بحرانی است).

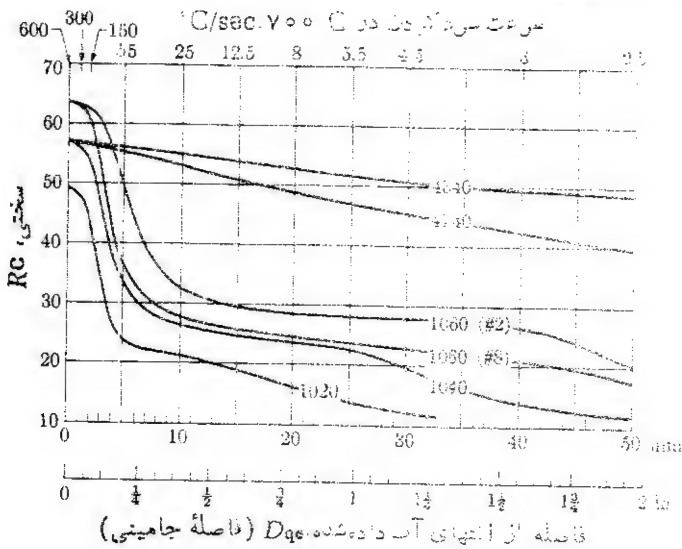
ساده یا کم آلیاژ صادق است زیرا دارای چگالی، ظرفیت گرمایی و رسانندگی گرمایی قابل مقایسه‌ای اند، سه خاصیتی که بر نفوذپذیری گرمایی اثر می‌گذارند.*

شکل ۱۱-۶-۴ منحنیهای سختی پذیری چند نوع فولاد متداول را نشان می‌دهد. این منحنیها نشان‌دهنده سختی بر حسب سرعت سرد کردن اند، سرعتها در محور بالایی بر حسب $^{\circ}C/sec$ نشان داده شده است. ولی به طور کلی بهتر است «فاصله آن تا انتهای آب داده شده» یا D_{qe} (یعنی فاصله جامینی) را به کار بریم، زیرا آن را از داده‌های آزمایشگاه می‌توان مستقیماً رسم کرد. ما این روش ساده را به کار خواهیم برد.**

از شکل ۱۱-۶-۴ چند نکته را می‌توان دریافت. فولادهای کم آلیاژ (۴۱۴۰ و ۴۳۴۰) در مقایسه با فولادهای ساده سختی پذیری بیشتری دارند یعنی برای سرعت سرد شدن

* فولادهای زنگ‌نزن از آلکویی که در شکل ۱۱-۶-۳ دیده می‌شود تبعیت نمی‌کنند، زیرا بالا بردن مقدار عناصر آلیاژی، رسانندگی گرمایی آنها را تا حد زیادی کاهش می‌دهد بی آنکه روی چگالی و یا ظرفیت گرمایی اثری داشته باشند. ولی این فولادها را به ندرت برای سخت شدن آب می‌دهند.

** یعنی در دو منحنی مختلف سختی پذیری فواصل مساوی از انتهای آب داده شده سرعت‌های سرد کردن ویژه‌ای دارند.



	C	Mn	Ni	Cr	Mo	نماد استاندارد
۱۰۲۰	۰۰۲	۰۰۹۰	۰۰۰۱	—	—	A
۱۰۴۰	۰۰۳۹	۰۰۸۹	۰۰۰۱	۰۰۰۱	—	A
۱۰۶۰	۰۰۶۲	۰۰۸۱	۰۰۰۲	—	—	A2/A
۴۱۴۰	۰۰۳۸	۰۰۷۹	۰۰۰۱	۱۰۰۱	۰۰۲۲	A
۴۳۴۰	۰۰۴۰	۰۰۷۵	۱۰۷۱	۰۰۷۷	۰۰۳۲	A

شکل ۹۹-۳ منحنی سختی پذیری شش نوع فولاد با اندازه دانه و ترکیب مشخص. این فولادها طبق شکل ۹۹-۳ (الف) از یک انتها آب داده شده‌اند. از نظر صنعتی هر فولاد، منحنی سختی پذیری ویژه‌ای دارد زیرا ترکیب آن با سایر فولادها کاملاً یکسان نیست. در نتیجه معمولاً آزمایش سختی پذیری در مورد هر فولادی که برای آبدادن و بازپخت تولید می‌شود انجام خواهد شد.

سختی اینها به بیشینه ممکن نزدیکتر است. به ویژه برای فولاد C ۰۴٪ مطابق با شکل ۱۱-۱۱، بیشینه سختی $R_{C50} = 57$ است. در $D_{qe} = 10 \text{ mm}$ (که در آن سرعت سرد شدن برابر 25°C/sec است)، سختی فولادهای ۴۳۴۰ و ۴۱۴۰ به ترتیب برابر R_{C50} و R_{C55} است؛ سختی فولاد ۱۰۴۰ فقط R_{C26} است. همان‌طور که انتظار می‌رود فولادهایی که کمترین بیشتری دارند سخت‌ترند (۱۰۶۰ به نسبت به ۱۰۴۰ و نسبت به ۱۰۲۰)؛ این امر در مورد هر فولادی با سرعت‌های زیاد ($D_{qe} = 5 \text{ mm}$) و نیز در مورد سرد کردن با سرعت‌های کم ($D_{qe} = 25 \text{ mm}$) صادق است. مثلاً در مورد فولادهای ۱۰۶۰ منحنی دوم را می‌بینیم. فولاد درشت‌دانه‌تر (۲) سختی پذیری بیش‌تر دارد زیرا تجزیه استنیت آهسته‌تر

صورت می گیرد. (به شکل ۱۱-۴-۸ رجوع کنید) یعنی برای سرعت سرد کردن معین، استنیت درشت دانه نسبت به استنیت ریز دانه مارتنزیت بیشتری تولید می کند.*

استفاده از منحنیهای سختی پذیری. منحنیهای سختی پذیری که با روش آب دادن انتها به دست می آیند ارزش عملی زیادی دارند. زیرا (۱) با دانستن سرعت سرد شدن فولاد می توان سختی را مستقیماً از روی منحنی سختی پذیری آن تعیین کرد و (۲) اگر سختی در نقطه ای معین شود، با استفاده از منحنی سختی پذیری می توان سرعت سرد شدن در آن نقطه را برای فولاد مورد نظر به دست آورد.

شکل ۱۱-۶-۴ منحنی سختی پذیری را برای فولاد AISI-SAE ۱۰۴۰ با اندازه دانه و ترکیب مشخص نشان می دهد.* انتهای آب داده شده، دارای بیشینه سختی ممکن برای فولاد ۰.۴٪ کربن است زیرا بسیار سریع سرد شده و فقط مارتنزیت تشکیل شده است. ولی اندکی دورتر از انتهای آب داده شده سرعت سرد شدن آنقدر سریع نیست که از تشکیل فریت و کاربید جلوگیری کند، و بنابراین در آن نقطه بیشینه سختی به دست نیامده است.

در آزمایشگاه می توان سرعت سرد شدن را در درون میله های فولادی نیز تعیین کرد. مثلاً جدول ۱۱-۶-۱ سرعت سرد شدن در دمای اوتکتوئید را برای سطح، نیمه شعاع و مرکز میل گرد ۷۵ میلی متری در صورت سرد کردن آرام در آب یا روغن به هم زده شده نشان می دهد. این سرعتها با استفاده از ترموکوپلهایی که در حین آب دادن درون میله جا داده شده بودند به دست آمده اند. برای میله های دیگری با قطرهای متفاوت نیز می توان این داده ها را به دست آورد. این داده ها در شکل ۱۱-۶-۵ خلاصه شده اند.

با استفاده از داده های شکل ۱۱-۶-۵ و منحنی سختی پذیری می توان سختی عرضی را در هر نقطه از فولاد آب داده شده پیش بینی کرد. مثلاً سرعت سرد شدن مرکز میله ای به قطر ۷۵ میلی متر که در روغن سرد شده برابر با 55°C/sec است و چون این سرعت سرد شدن با سرعت سرد شدن نقطه ای به فاصله ۲۵ میلی متر از انتهای آب داده شده میله

* فولادهای دیگر شکل ۱۱-۶-۴ نیز منحنیهای سختی پذیری مختلفی برای دیگر اندازه دانه ها دارند. مزیت اصلی آزمایش آب دادن انتهای جامینی آن است که می توان از همان فولادی که برای ساختن چرخ دنده، ابزار و غیره به کار می رود؛ نمونه ای درست کرد. بنابراین سختی پذیری دقیق آن مشخص می شود. بدین معنی که متغیرهایی مثل اندازه دانه و اختلاف اندک در ترکیب شیمیایی خود به خود در نظر گرفته می شود.

** این داده ها به ترکیب (و اندازه دانه) فولاد ۱۰۴۰ مربوط اند. تغییرات اندکی در مشخصات شیمیایی هر فولاد ممکن است (مثلاً، در فولاد ۱۰۴۰، $C=0.44/0.37$ ، $Mn=0.90/0.60$ ، $S=0.05$ و $P=0.04$ و $Si=0.25/0.15$) در نتیجه ممکن است منحنیهای سختی پذیری دو فولاد ۱۰۴۰ متفاوت، اندکی تفاوت داشته باشند.

جدول ۱۱-۶-۱ سرعت سرد شدن میله فولادی به قطر ۷۵ میلی متر (تقریباً ۳ اینچ در 700°C)

آب دادن در روغن به هم زده شده		آب دادن در آب به هم زده شده		محل
D_{qe}^*	$^{\circ}\text{C}/\text{sec}$	D_{qe}^*	$^{\circ}\text{C}/\text{sec}$	
۱۱	~ 20	۳	~ 100	سطح
۱۸	۹۰۵	۹	۲۷	$\frac{3}{4}$ شعاع
۲۱	۷۰۵	۱۴	۱۴	نیمه شعاع
۲۵	۵۰۵	۱۷*	۱۱	مرکز

* فاصله از انتهای آب داده شده میله جامینی که همان سرعت سرد کردن را در 700°C دارد (فاصله جامینی).

** مشاهده می شود که هنگام آب دادن مرکز میله ای به قطر ۷۵ میلی متر، که ۳۷ میلی متر از سطح فاصله دارد، سرعت سرد شدن همان سرعت سرد شدن $D_{qe} = 17\text{mm}$ است، و بنا بر این بسیار سریعتر از فولادی است که 37mm از انتهای آب داده شده میله جامینی فاصله دارد. ($11^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ نسبت به $375^{\circ}\text{C}/\text{sec}$) البته گرما به طور شعاعی از میله ۷۵ میلی متری خارج می شود، ولی این کار در درجه اول از یک سر میله جامینی صورت می گیرد.

جامینی برابر است سختی این دو نیز مساوی خواهد بود. به این ترتیب اگر میله از فولاد ۱۰۴۰ باشد (شکل ۱۱-۶-۴) سختی مرکز آن برابر 23RC خواهد بود. شکل ۱۱-۶-۴ همچنین منحنیهای زیر را برای مرکز میله های فولادی آب داده شده در روغن، به قطر ۷۵ میلی متر نشان می دهد (505°C در هر ثانیه سرد شده است):

AISI-SAE: ۱۰۴۰ ۴۱۴۰ ۱۰۲۰ ۴۳۴۰ (اندازه دانه ۸) (اندازه دانه ۲)

۱۰۶۰

۱۰۶۰

۲۸

۲۴

۵۲

۱۴

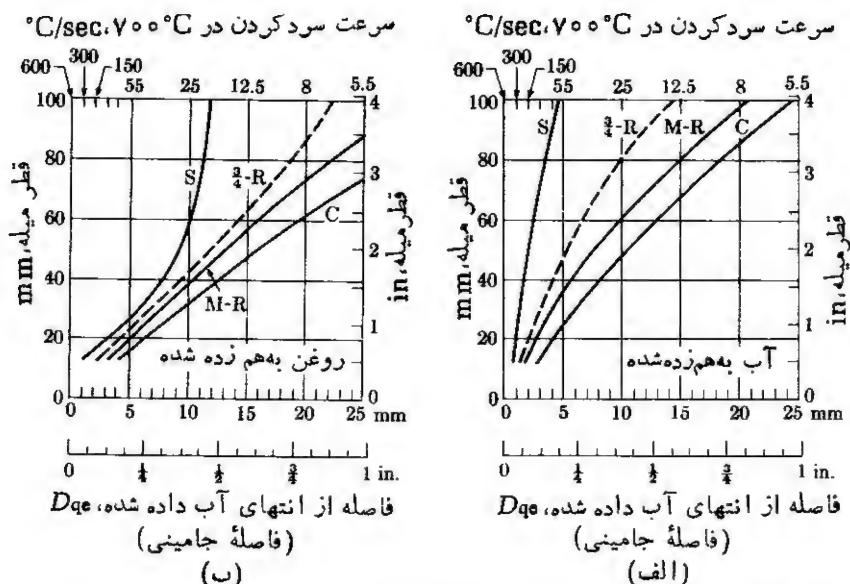
۴۷

۲۳

:RC

در مثالهای زیر سختی فولادهای مختلف آب داده شده مختصرأ مطرح شده است.

سختی پس از بازپخت. مثالهای ۱۱-۶-۳ و ۱۱-۶-۴ سختی فولاد آب داده شده را بیان می کنند. چنانکه شکل ۱۰-۳-۹ نشان می دهد هنگام بازپخت، بر اثر تجمع ذرات



شکل ۱۱-۶-۵ سرعت سرد شدن در میل‌های فولادی استوانه‌ای که الف) در آب به هم زده شده و ب) در روغن به هم زده شده سرد شده‌اند. محور افقی بسالایی سرعت سرد شدن در $^{\circ}\text{C}$ و محور افقی پایینی نقاط معادل آن از نظر فاصله با انتهای آب داده شده است. C) مرکز میل، M-R) وسط شعاع، S) سطح، و خط چینها، منحنی تقریبی برای $3/4$ شعاع است). سرعت سرد کردن در آب به دلیل داشتن گرمای تبخیر زیاد بسیار بالاست.

کاربید، سختی کاهش می‌یابد. داده‌های شکل فوق برای فولاد اوتکتوئید ساده‌ای (۱۰۸۰) رسم شده است. فولادهای آلیاژی آهسته‌تر بازپخت می‌شوند. * مهندسانی که با عملیات گرمایی انواع فولادها سروکار دارند می‌توانند داده‌های لازم برای بازپخت را از کتابهای متالورژی به دست آورند.

مثال ۱۱-۶-۱ سرعت سرد کردن مرکز و وسط شعاع میل‌های استوانه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر را وقتی که در آب به هم زده شده آب داده می‌شود معین

* مثلاً فولاد ابزار «تندبر» عناصری چون V, Cr, W و Mo دارد که کاربیدهای بسیار پایدار تشکیل می‌دهند. ذرات کاربید این عناصر بسیار کندتر از Fe_3C در فولاد ساده تجمع می‌یابند. بنابراین فولادهای ابزار را می‌توان در دماهای بالاتر (عمل با سرعت بیشتر) استفاده کرد بدون آنکه مسائلی نظیر بیش از حد بازپخت شدن، نرم شدن، و از بین رفتن لبه‌های برنده در آنها به صورت بحرانی وجود داشته باشد.

کنید. (میله به حدی بلند است که اثر سرد شدن انتهای میله در اینجا مطرح نیست.)

حل: با توجه به شکل ۱۱-۶-۵ (الف) برای میله استوانه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر داریم

$$D_{qe} = 4 \text{ mm} : \text{سرعت سرد کردن مرکز}$$

از شکل ۱۱-۶-۳ [یا از محور بالایی شکل ۱۱-۶-۵ (الف)] داریم

$$\text{سرعت سرد کردن} = 75^\circ\text{C/sec}$$

$$D_{qe} = 25 \text{ mm}, \sim 125^\circ\text{C/sec} : \text{سرعت سرد کردن وسط شعاع}$$

توضیح. می‌بینید که مرکز میله ۲۰ میلی‌متری از سطح میله، ۱۰ میلی‌متر فاصله دارد. و لسی سرعت سرد شدن آن بسیار سریعتر از نقطه‌ای است که از انتهای میله ج‌امینی ۱۰ میلی‌متر فاصله دارد و سرعت سرد شدن آن 25°C/sec است. این سرعت بیشتر است زیرا گرما نه فقط در جهت طولی بلکه در جهات شعاعی خارج می‌شود. علاوه بر این ذخیره‌ای از گرما وجود دارد که باید از نقطه‌ای که ۲۰ میلی‌متر از انتهای آب داده شده میله فاصله دارد بگذرد.

▲

مثال ۱۱-۶-۲ در نقطه‌ای به فاصله ۵ میلی‌متر از سطح میله ۲۰ میلی‌متری از فولاد ۲۱۴۰ که در روغن به هم زده شده آب داده شده است، سختی چقدر است.

حل: از آنجا که شعاع ۲۰ میلی‌متر است این نقطه در $3/4$ شعاع قرار دارد

$$\text{از شکل ۱۱-۶-۵} \quad D_{qe} = 9 \text{ mm (و } CR \sim 27^\circ\text{C/sec)}$$

$$\text{از شکل ۱۱-۶-۲} \quad R_c = 53 \text{ سختی}$$

توضیح. داده‌ها را می‌توان با درون‌یابی منحنیهای ۱۱-۶-۴ و ۱۱-۶-۵ به دست آورد. برای این کار توصیه می‌شود که به جای $^\circ\text{C/sec}$ از D_{qe} استفاده شود، زیرا $^\circ\text{C/sec}$ تا حد زیادی غیر خطی است.

▲

مثال ۱۱-۶-۳ سختی عرضی دو میله فولادی به قطر ۳۸ میلی‌متر را که ترکیب آنها به ترتیب AISI-SAE ۱۰۴۰ و ۴۱۴۰ است و در آب، آب داده شده‌اند رسم کنید.

حل:

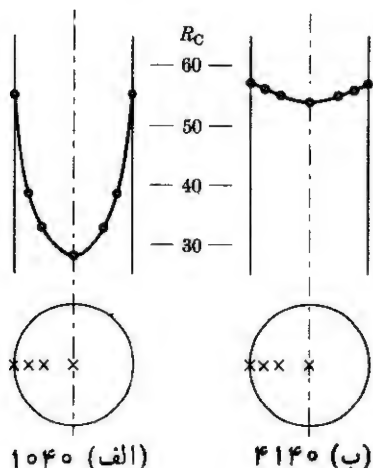
از روی شکل ۱۱-۶-۲

از روی شکل ۱۱-۶-۵ (الف)

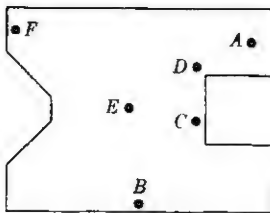
AISI-SAE ۲۱۴۰	AISI-SAE ۱۰۴۰	سرعت سرد شدن در ۷۰۰°C D_{qe}°	سرعت سرد شدن تقریبی در ۷۰۰°C D_{qe}° °C/sec		محل
۵۷ R_C	۵۵ R_C	۱۰۵mm	۱۰۵mm	۲۰۰	سطح
۵۶ R_C	۳۸ R_C	۴mm	۴mm	۷۵	$\frac{3}{4}$ شعاع
۵۵ R_C	۳۴ R_C	۵mm	۵mm	۵۵	وسط شعاع
۵۴ R_C	۲۸ R_C	۷۰۵mm	۷۰۵mm	۳۵	مرکز

* D_{qe} سرعت سرد شدن، بر حسب فاصله از انتهای آبداده شده میله جامینی.

توضیح. سختی عرضی دو فولاد مثال ۱۱-۶-۳ را شکل ۱۱-۶-۶ نشان می‌دهد. گرچه سختی سطحی دو فولاد بسیار نزدیک به یکدیگر است، تفاوت سختی پذیری آنها موجب به وجود آمدن سختی بیشتری در مرکز فولاد ۲۱۴۰ AISI-SAE می‌شود همان‌طور



شکل ۱۱-۶-۶ سختی عرضی.
(مثال ۱۱-۶-۳ را ببینید.)



شکل ۷-۶-۱۱ مقطع میله ۷. (مثال ۴-۶-۱۱ را ببینید).

که نشان داده شده است این فولاد عناصر آلیاژی بیشتری دارد که سرعت تبدیل استنیت به فریت و کاربید را کاهش می‌دهد. در نتیجه مارتنزیت بیشتری می‌تواند تشکیل شود. ▲

مثال ۴-۶-۱۱ در شکل ۷-۶-۱۱ مقطع میله فولادی V شکل از جنس فولاد ۱۰۶۰ AISI-SAE (عدد اندازه دانه ۲) نشان داده شده است. پس از آب دانه شدن در روغن، سختی نقاط مختلف چنین است:

$$A-40R_C, B-36R_C, C-33R_C, D-32R_C, E-31R_C, F-62R_C$$

سختی چنین نقاطی را برای میله مشابهی از فولاد ۴۰۶۸ AISI-SAE به دست آورید. حل: برای فولاد داده شده، سختی به سرعت سرد شدن بستگی دارد.

AISI-SAE ۴۰۶۸

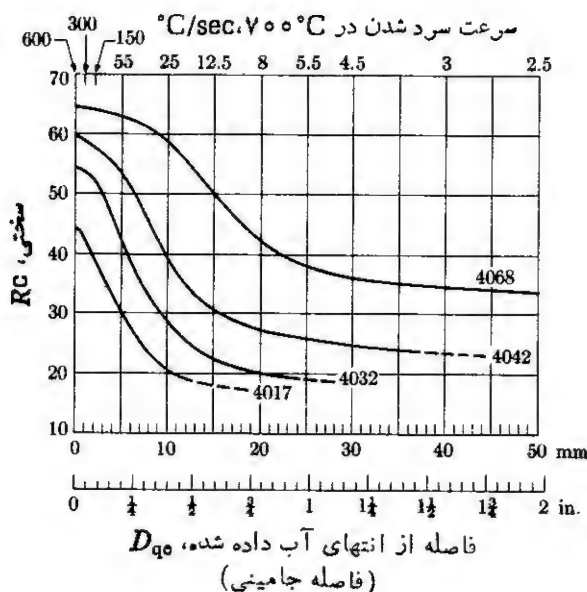
(عدد اندازه دانه ۲) AISI-SAE ۱۰۶۰

از شکل ۸-۶-۱۱

از شکل ۷-۶-۱۱

نقطه	سختی	سرعت تقریبی سرد شدن D_{qe}°	سرعت سرد شدن در $700^{\circ}C$ D_{qe}°	سختی
A	۴۰ R_C	Vmm	Vmm	۶۲ R_C
B	۴۶	۸	۸	۶۱
C	۳۳	۱۰	۱۰	۵۹
D	۳۲	۱۱	۱۱	۵۷
E	۳۱	۱۲	۱۲	۵۵
F	۶۳	۱	۱	۶۲

▲ D_{qe} سرعت سرد شدن، بر حسب فاصله از انتهای آب دانه شده میله جамینی.



شکل ۱۱-۶-۸ منحنیهای سختی پذیری فولادهای $40X \times 40$. به استثنای مقدار کربن، ترکیب تمام این فولادها یکسان است. مقدار کربن بیشتر طبق شکل ۱۱-۶-۱ مارتنزیت سخت تر و $\alpha + \bar{C}$ سخت تری به وجود می آورد.

مثال ۱۱-۶-۵ میله ای از فولاد ۱۰۲۵ (به قطر ۳۲ میلی متر) در سطح تا 206°C و در ۲ میلی متری زیر سطح تا 350°C کربن دهی شده است به طوری که ۴ میلی متر زیر سطح بدون تأثیر باقی مانده است.

الف) تغییرات سختی فولاد را پس از آب دادن در آب معین کنید.
ب) اگر کربن دهی نمی شد تغییرات سختی به چه صورت بود؟ (عدداً اندازه دانه = ۸)
حل:

(ب)		(الف)		D	
$27R_C$	2020°C	$62R_C$	2062°C	15mm	سطح
$\sim 20R_C$	20	~ 50	35	~ 25	۲ میلی متری
34	20	34	20	3	۴ میلی متری
26	20	26	20	4	نیمه شعاع
22	20	22	20	6.5	مرکز

موور و بررسی مطالب

فرایندهای تابکاری شامل گرم کردن و سرد کردن آهسته است. این فرایندها امکان نزدیک شدن ماده به حالت تعادل را فراهم می آورند. میکروساختار و خواص حاصل تابعی است از ماده‌ای که تابکاری می شود. در بعضی مواد تابکاری موجب تنشگیری می شود؛ در بعضی دیگر تبلور مجدد صورت می گیرد؛ در تمام موارد فلز نرم می شود؛ معمولاً اگر فقط یک فاز وجود داشته باشد انعطاف پذیری افزایش می یابد، ولی اگر میکروساختار حاصل مسیری با تردی زیاد برای پیشروی ترک ایجاد کند، انعطاف پذیری کم می شود.

فرایندهای یکنواخت کردن برای ایجاد یکنواختی بیشتر در محصول، از نظر ترکیب شیمیایی و یا میکروساختار طراحی شده اند.

سرد کردن سریع مانع ایجاد تعادل می شود. در ساده ترین صورت می توانیم محلول جامد را در دماهای زیر حد حلالیت نیز نگاه داریم. این کار بیش از هر کار دیگری سختی را بالا می برد. این امر همچنین مرحله‌ای از فرایند پیرسختی یعنی رسوب کردن همدم در دمای پایین* است.

تبدیل همدمای $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$ در فولاد از منحنی کلی C_t تبعیت می کند. تبدیل با سرد کردن مداوم بیش از همه معمول است، ولی به سرعت سرد کردن (CR) معینی نیاز دارد. با سرد کردن سریع (آب دادن) از واکنش معمولی اوکتوئید جلوگیری شده و مارتنزیت سخت تشکیل می شود. فولادهای آلیاژی سختی پذیری بیشتری دارند زیرا سرعت بحرانی سرد کردن لازم برای تشکیل مارتنزیت در این فولادها کمتر است؛ برعکس، فولادهای آلیاژی نسبت به فولادهای ساده کربنی خیلی زودتر به شینه سختی ممکن را در سرعت معین سرد کردن به دست می آورند. منحنیهای سختی پذیری امکان بر آورد تغییرات سختی را توسط آزمایشهای استاندارد شده آب دادن انتهایی فراهم می آورند.

مثالهای این فصل در درجه اول در مورد فلزات و به ویژه فولادها بود، زیرا عملیات گرمایی آنها گسترش وسیعی یافته و اصلاح شده است. ولی همین مفاهیم در مورد سایر مواد نیز به کار می روند. مثلاً شیشه را می توان ابتدا توسط تغییر شکل ویسکوز شکل داد و سپس عملیات گرمایی کرد تا توسط تبلور شیشه‌ای محصولی محکمتر ایجاد شود.

سؤالات تشریحی

۱. چرا نفوذ، تبلور مجدد، تنشگیری (بخش ۷-۵)، و جریان ویسکوز (بخش ۸-۸) روابط مشابهی در مورد زمان و دما دارند؟
۲. تفاوت بین یکنواخت کردن فولاد و تابکاری کامل آن را ذکر کنید. اساس این تفاوتها از نظر فنی چیست؟

* زیر «زانوی» منحنی C.

۳. دمای انتقال شیشه T_g با دمای نقطه تابکاری شیشه ($\eta = 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) و دمای نقطه کرنش ($\eta = 10^{13.5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) چگونه مقایسه می‌شود؟
۴. چرا فوق گرمایش در واکنش عملیات محلولی مشکلتر از فوق سرمایش در واکنش رسوب کردن به وجود می‌آید؟ دو دلیل ذکر کنید.
۵. تغییرات داده‌های جدول ۱۱-۳-۱ را تشریح کنید.
۶. به عنوان کار تولیدی عملی، چرا آب دادن آلیاژ ۹۶Al-۴Ca تا دمای اتاق و سپس گرم کردن مجدد تا 100°C برای پیرسختی، ساده‌تر از آب دادن مستقیم تا دمای 100°C است؟
۷. الف) با مراجعه به نمودارهای فازی فصل ۹، چه آلیاژی برای رسوب سختی انتخاب می‌شوند؟ ب) برنج Cu-Zn هرگز پیرسختی نمی‌شود. چرا؟
۸. فولادی که برای قوطیهای مواد غذایی به کار می‌رود کمتر از ۰.۱٪ کربن دارد، به طوری که قابل تغییر شکل است. بنابراین جوابگوی عملیات آب دادن و بازپخت نیست؛ ولی درحین فرایند بسته بندی مواد غذایی اندکی سخت می‌شود. دلیلی بر آن ذکر کنید.
۹. قانون اهرم را نمی‌توان برای نمودار تبدیل همدا به کار برد. چرا؟
۱۰. چرا منحنی «شروع» در شکل ۱۱-۴-۶ در بازوی بالایی خود دوشاخه دارد؟
۱۱. به طور کلی تعیین آغاز (یا پایان) هر واکنش (در مقایسه با نقطه وسط) بسیار مشکل است. دو دلیل بیاورید. (راهنمایی: به همین دلیل است که M_s معمولاً ۱٪ ~ واکنش در نظر گرفته می‌شود؛ و M_F معمولاً ۹۹٪ کامل به حساب می‌آید).
۱۲. چرا استنیت در فولاد ریزدانه سریعتر به $(\alpha + \bar{C})$ تبدیل می‌شود تا در فولاد درشت دانه؟
۱۳. چرا استنیت فوکاد ۲Cr٪ آهسته تر از استنیت در فولاد ۷Cr٪، به $(\alpha + \bar{C})$ تبدیل می‌شود.
۱۴. وسایل آزمایشگاهی لازم برای وقوع تبدیل همدا در مدت ۱ ثانیه (۱۰٪ ±) در فولاد را طرح کنید.
۱۵. چرا از شکل ۱۱-۴-۶ برای سیم (ج)، مرحله ۳، مثال ۱۱-۴-۱ استفاده نمی‌کنیم؟
۱۶. در نمودار I-T، شکل ۱۱-۴-۶ منحنی T_f قبل از آنکه منحنی M_f را قطع کند به انتها می‌رسد. دلیل آن را ذکر کنید.
۱۷. مارتنزیت بازپخت شده، پرلیت، بینیت، مارتنزیت، پرلیت کروی، فریت، و کاربید را با هم مقایسه کنید.
۱۸. فرض کنید CR_M و CR_P برای فولادی به ترتیب $74^\circ\text{C}/\text{sec}$ و $15^\circ\text{C}/\text{sec}$ باشد. اگر فولاد با سرعت $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ سرد شود، چه فازهایی موجود خواهد بود؟ با $20^\circ\text{C}/\text{sec}$ یا $50^\circ\text{C}/\text{sec}$ ؟ و با $100^\circ\text{C}/\text{sec}$ چطور؟
۱۹. فرض کنید همان CR_M و CR_P که در سؤال ۱۸ ذکر شده است، برقرار باشد. اگر این فولاد با سرعت $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ سرد شود، سخت تر از زمانی که با سرعت $5^\circ\text{C}/\text{sec}$

- سرد شود خواهد بود. چرا؟ (هر دو فقط شامل α و \bar{C} خواهند بود).
۲۰. منحنیهای t_F و t_S مربوط به تبدیل همدمای برای تبدیل با سرد کردن مداوم «به طرف پایین و به طرف راست تغییر محل می دهند (شکل ۱۱-۴-۱۰)» چرا M_F و M_S در هر دو فرایند یکسان باقی می مانند؟
۲۱. توضیح دهید که چرا فولادهای کم آلیاژ معمولاً به صورت فولادهایی که با آب دادن و بازپخت عملیات گرمایی می شوند مشخص می شوند.
۲۲. بینیت را نمی توان با سرد کردن مداوم فولاد ۱۰۸۰ به دست آورد. چرا؟
۲۳. تفاوت بین سختی و سختی پذیری را شرح دهید.
۲۴. چرا وقتی چرخ دنده آب داده می شود فولاد (با آب) باید غیر ساکن باشد؟
۲۵. چرا مرکز میله فولادی استوانه ای به قطر ۲۵ میلی متر با آب دادن سختی بیشتری می باید تا فولادی که ۲۵ میلی متر پشت انتهای میله جамینی قرار دارد؟ کدامیک سریعتر آب داده می شود؟
۲۶. دمایی که برای کربن دهی انتخاب شده معمولاً همان است که برای یکنواخت کردن به کار می رود. چرا دمایی در گستره α به کار نمی رود تا کربن سریعتر در آن ساختار نفوذ کند؟ چرا دمایی بیشتری در گستره γ به کار نمی رود؟

مسائل

۱-۱-۹۹ آلیاژ مسی که ۳۵٪ سردکاری شده، پس از يك ساعت در 295°C (564°F) تبلور مجدد یافته است (تا ۵۰٪ کامل شده است). در 325°C (617°F) زمان لازم فقط ۱۵ دقیقه بود. برای اینکه این تبلور مجدد در مدت ۶ ثانیه تا ۵۰٪ کامل شود، کمینۀ دمایی لازم برای گرمکاری چقدر است؟

جواب: 466°C (871°F)

۱-۱-۱۱ دمایی برای تابکاری (الف) فولاد ۱۰۴۰؛ (ب) فولاد ۱۰۸۰؛ (ج) فولاد ۱٪ کربن انتخاب کنید.

۱-۱-۱۱-۳ چه دمایی را برای تابکاری فولادی حاوی ۲۵٪ نیکل و ۵۰٪ کربن پیشنهاد می کنید؟

جواب: 760°C

۱-۱-۱۱-۴ برای تشکیل برلیت کروی در فولاد ۱۰۹۰ عملیات گرمایی مناسب را انتخاب کنید.

۱-۱-۱۱-۲ (الف) برای یکنواخت کردن فولاد ۱۰۳۰ چه دمایی باید به کار رود؟ (ب) فولاد ۱۰۸۰ چطور؟ (ج) فولاد ۱٪ کربن چطور؟

جواب: (الف) 880°C

□ ۱۱-۲-۲ دمای یکنواخت کردن فولاد مثال ۹-۹-۱ چقدر است؟

۱۱-۲-۳ بیست کیلوگرم از آلیاژ ۸۸Al-۹۲Mg ابتدا ذوب و سپس سریعاً تا 500°C سرد شده است. از آنجا که زمان کافی برای نفوذ در جامد وجود نداشته است، ترکیب میانگین ۴، ۵۸Al است. (الف) ترکیب مایع در 500°C چیست؟ (فرض کنید نفوذ در مایع سریع باشد.) (ب) چه مقدار مایع در 500°C موجود است؟ (ج) در چه دمای γ پدیدار خواهد شد؟ (د) ترکیب مایع نهایی چیست؟

جواب: (الف) ۲۳Al-۷۷Mg (ب) ۳۳kg (ج) 437°C (د) ۳۲Al-۶۸Mg

۱۱-۳-۱ در فلزی اگر زمان پیر شدن در دمای 380°C ده ثانیه باشد، یا در 315°C ۱۰۰ ثانیه باشد، بیشینه سختی به دست می آید. هیچیک از اینها برای تولید مناسب نیستند زیرا نمی توانیم به یکنواخت گرم شدن قطعات اطمینان داشته باشیم. دمای را پیشنهاد کنید که در آن بیشینه سختی در ۱۰۰۰ ثانیه (۱۵ دقیقه-۲۰ دقیقه)، که زمان مناسب برای تولید است، به دست آید.

جواب: 260°C

۱۱-۳-۲ چه زمانی طول می کشد تا فلز مسئله قبل در 100°C به بیشینه سختی برسد؟

۱۱-۳-۳ توضیح دهید چرا آلیاژ ۹۲٪ مس، ۸٪ نیکل را می توان (یا نمی توان) پیر سختی کرد.

۱۱-۳-۴ توضیح دهید چرا آلیاژهای زیر را می توان (یا نمی توان) برای پیر سختی در نظر گرفت. (الف) ۹۷٪ آلومینیم، ۳٪ مس. (ب) ۹۷٪ مس، ۳٪ روی. (ج) ۹۷٪ نیکل، ۳٪ مس. (د) ۹۷٪ مس، ۳٪ نیکل. (ه) ۹۷٪ آلومینیم، ۳٪ منیزیم. (و) ۹۷٪ منیزیم، ۳٪ آلومینیم.

۱۱-۳-۵ اگر فولادی (۳۷W و ۹۹۷۷ W/oFe) از 700°C (1300°F) آب داده شود، و دوباره گرم شده و به مدت ۳ ساعت در 100°C نگه داشته شود، اندکی پیر سختی در آن دیده می شود. دلیل این سختی چیست؟

جواب: حلالیت کربن در فریت کاهش می یابد.

۱۱-۳-۶ يك سازنده هواپیما محموله ای از میخ پرچمهایی از آلیاژ آلومینیم دریافت کرده است که قبلاً پیر سختی شده اند. آیا می توان آنها را مجدداً قابل استفاده کرد؟ شرح دهید.

۱۱-۳-۷ (با مراجعه به شکل ۱۱-۳-۳) نموداری را انتخاب کنید که ارتباط بین دما و زمان را برای حداکثر سختی نشان دهد و تخمین زدن زمان رسیدن به حداکثر سختی در 100°C (توسط شکل) را ممکن سازد. این زمان برای آلومینیم ۲۰۱۴ چقدر است؟

جواب: تقریباً ۲۰۰۰ ساعت.

۸-۳-۱۱ با استفاده از شکل (طبق مسئله ۱۱-۳-۷) زمان لازم برای رسیدن به 200MPa در 100°C را تخمین بزنید.

۱۱-۴-۱۱ قطعه کوچکی از فولاد 1080 تا 800°C گرم شده، تا 60°C - آب داده شده، بلافاصله تا 300°C مجدداً گرم شده و به مدت ۱۰ ثانیه در آن دما نگه داشته شده است. دریایان این مدت چه فازهایی وجود دارند؟

جواب: مارتنزیت (با بازپخت مناسب تبدیل به $\alpha + \text{کاربید می شود}$).

۱۱-۴-۲ مقدار فولاد 1045 با سرعت از 850°C تا 400°C آب داده شده و به مدت ۱ ثانیه؛ ۱۰ ثانیه؛ ۱۰۰ ثانیه در آن دما نگه داشته شده است. چه فازهایی در هر حالت موجود خواهند بود؟

۱۱-۴-۳ مقدار فولاد 1045 به سرعت از 850°C تا 425°C آب داده شده است و قبل از آب دادن مجدداً تا 250°C ، به مدت ۵ ثانیه در 425°C نگه داشته شده است. (الف) درست قبل از آب دادن ثانوی چه فازهایی موجود خواهند بود؟ ترکیب هر کدام را مشخص کنید. (ب) بلافاصله پس از آب دادن ثانوی چه فازهایی موجود خواهند بود؟

جواب: (الف) $(\gamma (25\%))$ ، $\alpha (75\%)$ و \bar{C} (ب) $(\gamma (25\%))$ ، $\alpha (75\%)$ و \bar{C} ؛ مسئله ۱۱-۴-۳ را تکرار کنید ولی این بار به جای 20°C ، 275°C را قرار دهید.

۱۱-۴-۵ قطعه ای از فولاد 1020 را در 790°C (1450°F) به تعادل رسانده و سریعاً تا 400°C آب داده ایم. فولاد چه مدتی باید در آن دما نگه داشته شود تا به نقطه میانی تجزیه استنیت برسد؟

جواب: تقریباً ۸ ثانیه.

۱۱-۴-۶ نمودار تبدیل همما را برای فولاد $1.0\% \text{C}$ و $99.0\% \text{Fe}$ رسم کنید.

۱۱-۴-۷ نمودار تبدیل همما را برای فولاد 1020 رسم کنید.

جواب: $M_s = 450^\circ\text{C}$ ؛ $M_f = 290^\circ\text{C}$ ؛ α و γ بین 727°C و 855°C مدتها پایدار باقی می مانند؛ در 550°C منحنی نسبت به فولاد 1045 بیشتر به طرف چپ متمایل می شود.

۱۱-۴-۸ روی شش نمونه سیم مختلف از فولاد AISI-SAE ۱۰۴۵ یکی از شش عملیات گرمایی زیر انجام می شود. فازهایی را که بلافاصله پس از کامل شدن هر مرحله وجود خواهد داشت ذکر کنید.

- (الف) گرم کردن تا 825°C ، آب دادن تا 550°C ، نگه داشتن به مدت ۱۰ ثانیه در این دما؛
(ب) گرم کردن تا 900°C ، آب دادن تا 550°C ، نگه داشتن به مدت ۱۰ ثانیه در این دما، آب دادن تا 250°C ؛
(ج) گرم کردن تا 925°C ، آب دادن تا 300°C ، نگه داشتن در این دما؛
(د) گرم کردن تا 700°C ، آب دادن تا 250°C ؛
(ه) گرم کردن تا 250°C ، گرم کردن تا 225°C ، نگه داشتن در این دما به مدت ۱ ثانیه؛
(و) گرم کردن تا 750°C ، آب دادن تا 550°C .

۹-۴-۱۱ صد گرم از فولاد AISI-SAE ۱۰۲۵ به روشی که در زیر آمده، حرارت و آب داده شده است. فاز(ها) و مقدار هر فاز را بر حسب گرم در پایان هر مرحله ذکر کنید.

- (الف) گرم کردن تا 825°C ، آب دادن تا 120°C ؛
(ب) گرم کردن تا 750°C ، آب دادن تا 20°C ؛
(ج) گرم کردن تا 825°C ، آب دادن تا 550°C ، نگه داشتن به مدت ۷ ثانیه در این دما، گرم کردن تا 250°C .
(د) گرم کردن تا 825°C ، آب دادن تا 550°C ، نگه داشتن به مدت ۱۰ ثانیه گرم کردن تا 750°C .

جواب: (الف) 1100g ، (ب) 30g ، 1100g ، (ج) 93g ، 7g ، 30g ، 770g (د) 30g ، 770g
۹-۴-۱۱ سیم کوچکی از فولاد AISI-SAE ۱۰۲۵ طی مراحل متوالی تحت عملیات زیر قرار می گیرد:

- (۱) گرم کردن تا 875°C ، نگه داشتن در آن دما به مدت ۱ ساعت؛
(۲) آب دادن تا 250°C ، نگه داشتن در آن دما به مدت ۲ ثانیه؛
(۳) آب دادن تا 20°C ، نگه داشتن در آن دما به مدت ۱۰۰ ثانیه؛
(۴) گرم کردن مجدد تا 550°C ، نگه داشتن در آن دما به مدت ۱ ساعت؛
(۵) آب دادن تا 20°C و نگه داشتن در آن دما.
فازها یا ساختارهای موجود را پس از هر مرحله از عملیات گرمایی شرح دهید.

۹-۴-۱۱ (الف) مسئله ۱۱-۲-۱ را با مراحل (۱)، (۲)، (۵) تکرار کنید. (ب) مسئله ۱۱-۲-۱ را با مراحل (۱)، (۳)، (۴)، (۵) تکرار کنید. (ج) مسئله ۱۱-۲-۱ را با مراحل (۱)، (۲)، (۴)، (۵) تکرار کنید.

□ ۹-۴-۱۲ طبق شکل ۹-۲-۱۱، فولادی بدون مولیبدن در 720°C به حالت تعادل # این علامت نشان می دهد که در این مرحله از عملیات گرمایی قبل از آنکه به مرحله دیگر برویم تعادل حاصل می شود.

رسیده سپس تا 400°C آب داده می‌شود و به مدت تقریباً ۵ ثانیه در آن دما می‌ماند تا تجزیه γ آغاز شود. اگر 0.25M موجود باشد چه مرحله‌ای لازم است تا حاصل عملیات گرمایی هردو فولاد یکسان شود؟ شرح دهید.

۱۱-۵-۱۱ قطعه کوچکی از فولاد ۱۰۸۰، در حین آب دادن به مدت ۲۰ ثانیه در دمای 300°C (570°F) متوقف شده سپس تا 200°C آب داده می‌شود. چه فازهایی موجود خواهند بود؟ جواب: $M(0.8\text{C})$ ، و مقداری $\gamma(0.8\text{C})$ باقی‌مانده.

۱۱-۵-۲ فولاد ۱۰۴۵ در 825°C (1520°F) استنیتی شده، تا 670°C (1240°F) آب داده می‌شود، و قبل از آب دادن تا دمای متعارفی، یک دقیقه در 670°C باقی می‌ماند. (الف) چه فاز(ها) و میکروساختاری موجود خواهد بود؟ (ب) مسئله را برای فولاد ۲۳۴۰ تکرار کنید.

۱۱-۵-۳ فولاد ۱۰۸۰ آب داده شده و تا سختی 50RC بازپخت شده است. (الف) دمای استنیتی شدن چقدر باید باشد؟ (ب) اگر دمای بازپخت 400°C (750°F) باشد چه مدتی باید آن را بازپخت کرد؟

جواب: (الف) 750°C (1380°F) (ب) 40 min

۱۱-۵-۴ ساختارهای زیر را با هم مقایسه کنید: (الف) مارتزیت و مارتزیت بازپخت شده؛ (ب) مارتزیت بازپخت شده و بینیت؛ (ج) بینیت و پرلیت کروی.

۱۱-۵-۵ برای عملیات گرمایی زیر منحنی دما (محور عمودی) و زمان (محور افقی) را رسم کنید. دماهای مهم، زمانهای مربوط به آن، و دلایل رسم منحنی را به صورتی که کشیده‌اید ذکر کنید. (الف) یکنواخت کردن فولاد ۱۰۹۵، در مقایسه با تباکاری همان فولاد. (ب) عملیات محلول سختی آلیاژ $5\text{Cu}-95\text{Al}$ در مقایسه با پیرسختی همان آلیاژ. (ج) بازپخت استنیتی فولاد ۱۰۸۰ در مقایسه با بازپخت مارتزیتی (آب دادن منقطع) همان فولاد. (د) کروی کردن فولاد ۱۰۸۰ در مقایسه با کروی کردن فولاد ۱۰۵-۱۰.

۱۱-۵-۶ با استفاده از داده‌های مثال ۱۰-۱-۳ و پیوست (ج)، برای فولاد ۱۰۸۰ تعیین کنید که آیا تغییر حجم برای بازپخت مارتزیت ($M \rightarrow \alpha + \bar{C}$) بیشتر یا کمتر از تغییر حجم در مرحله آب دادن ($\gamma \rightarrow M$) است.

۱۱-۵-۷ \square ۷-میله‌ای از فولاد ۱۰۸۰ به قطر ۵۰ میلی‌متر آب داده شده و «پوسته‌ای» از مارتزیت به ضخامت ۲.۵ میلی‌متر تشکیل داده است. در حالی که مرکز استنیتی داغ است، می‌تواند تغییر حجم را با ($\gamma \rightarrow M$) تطبیق دهد (مثال ۱۰-۱-۳). اگر مرکز آهسته‌تر سرد شود مستقیماً به ($\alpha + \bar{C}$) تبدیل می‌شود. چه حلقه تنشی روی پوسته مارتزیتی قرار می‌گیرد؟ (برای ۱۰۸۰، $\rho_M = 7.799\text{ g/cm}^3$ ؛ $\rho_\gamma = 7.799\text{ g/cm}^3$ ؛ $\rho_M = 7.799\text{ g/cm}^3$ ؛ $\rho_{(\alpha + \bar{C})} = 7.799\text{ g/cm}^3$)

جواب: 1170 MPa کشش

□ ۱۱-۶-۱ سختی انتهای میله آزمایش آب دادن از فولاد AISI-SAE ۲۰۲۰ چقدر است؟

جواب: تقریباً $R_C 49$

□ ۱۱-۶-۲ انتهای آب داده شده میله جамینی باید $R_C 44$ سختی داشته باشد. میزان کربن موجود در فولاد چقدر باید باشد؟ شرح دهید.

□ ۱۱-۶-۳ (الف) سرعت سرد شدن، بر حسب $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ در وسط شعاع میله استوانه‌ای به قطر 50 mm که در روغن به هم زده شده آب داده شده است چقدر است؟ (ب) مقدار آن بر حسب فاصله از انتهای میله آب داده شده جамینی چقدر است؟

جواب: (الف) $17^{\circ}\text{C}/\text{sec} \sim$ (ب) 13 mm

□ ۱۱-۶-۴ مسئله ۱۱-۶-۳ را برای $3/4$ شعاع و آب دادن در آب تکرار کنید.

□ ۱۱-۶-۵ (الف) میله استوانه‌ای از فولاد ۱۰۴۰ به قطر 50 mm در روغن به هم زده شده آب داده شده است، سختی در وسط شعاع آن چقدر است؟ (ب) در آب به هم زده شده چطور؟

جواب: (الف) $R_C 25$ (ب) $R_C 28$

□ ۱۱-۶-۶ مسئله ۱۱-۶-۵ را برای $3/4$ شعاع تکرار کنید.

□ ۱۱-۶-۷ سختی مرکز میله استوانه‌ای از فولاد ۱۰۴۰ به قطر 50 mm میلی‌متر در حالات زیر چقدر است؟ (الف) آب داده شده در روغن به هم زده شده. (ب) آب داده شده در آب به هم زده شده.

جواب: (الف) $R_C 24$ (ب) $R_C 26$

□ ۱۱-۶-۸ میل گردی از فولاد ۱۰۴۰ در سطح $R_C 41$ سختی و در مرکز $R_C 28$ سختی دارد. سطح و مرکز میله با چه سرعتی از 700°C سرد شده است؟

□ ۱۱-۶-۹ میل گردی از فولاد ۱۰۴۰ به قطر 63 mm در روغن به هم زده شده آب داده می‌شود. سختی نقطه‌ای در فاصله 25 mm زیر سطح میل گرد را بر آورد کنید. (دلایل آن را بیان کنید.)

جواب: $R_C 24$

□ ۱۱-۶-۱۰ سختی عرضی فولاد ۱۰۴۰ که در شکل ۱۱-۶-۶ نشان داده شده است چگونه تغییر می‌کند؛ در صورتی که (الف) در روغن ساکن سرد شود؟ (ب) در آب ساکن سرد شود؟ (ج) اندازه دانه‌های استنیت آن درشت‌تر باشد. شرح دهید.

□ ۱۱-۶-۱۱ فولاد $40 \times \times$ پس از آنکه به سرعت $17^\circ\text{C}/\text{sec}$ سرد شده است، $40R_C$ سختی دارد. مقدار کرن آن چقدر است؟ اگر با دو برابر این سرعت آب داده شود سختی فولاد چقدر خواهد بود؟

جواب: (الف) 55% (ب) 4050 در $34^\circ\text{C}/\text{sec}$ ($D_{90} = 775\text{mm}$) $53R_C$

□ ۱۱-۶-۱۲ میلای استوانه‌ای از فولاد 4340 به قطر 80 میلی‌متر در روغن به هم زده شده، آب داده شده است. سختی عرضی را رسم کنید.

□ ۱۱-۶-۱۳ سختی عرضی را برای میلای از فولاد 1060 (به قطر 38 میلی‌متر) که (الف) در آب به هم زده شده آب داده شده، (ب) در روغن به هم زده شده، آب داده شده است رسم کنید. (عدد اندازه دانه = ۲).

جواب: $63R_C$; S ; 48 ; MR ; 37 ; C

□ ۱۱-۶-۱۴ میلای استوانه‌ای از فولاد 1040 (به قطر $= 40$ میلی‌متر، و طول بیش از 40 میلی‌متر) در آب به هم زده شده آب داده شده است. (الف) سرعت سرد شدن سطح میله از 700°C چقدر است؟ سرعت سرد شدن در مرکز میله چقدر است؟ (ب) سختی عرضی آن را رسم کنید.

□ ۱۱-۶-۱۵ سختی مرکز شش میله از یک نوع فولاد در زیر آمده است. با استفاده از این داده‌ها، منحنی سختی پذیری را برای فولاد رسم کنید (دانه‌مایی: فقط یک منحنی باید وجود داشته باشد).

قطر	آب داده شده در آب	آب داده شده در روغن
۲۵ میلی‌متر	$58R_C$	$57R_C$
۵۰ میلی‌متر	$55R_C$	$47R_C$
۱۰۰ میلی‌متر	$34R_C$	$30R_C$

جواب: $58R_C$ در $D_{90} = 5\text{mm}$; $56R_C$ در 10mm ; $49R_C$ در 15mm ; $39R_C$ در 20mm ; $33R_C$ در 25mm ; $31R_C$ در 30mm ; $30R_C$ در 35mm

□ ۱۱-۶-۱۶ سختی در وسط شعاع میله‌های مختلفی از جنس یک نوع فولاد در زیر آمده است. با استفاده از این داده‌ها، منحنی سختی‌پذیری فولاد را رسم کنید. (دانه‌مایی: فقط یک منحنی باید وجود داشته باشد).

قطر	آب داده شده در آب	آب داده شده در روغن
۲۵ میلی‌متر	$59R_C$	$58R_C$
۵۰ میلی‌متر	$56R_C$	$52R_C$
۱۰۰ میلی‌متر	$38R_C$	$31R_C$

مواد چندفاز: عملیات گرمایی ۵۵۱

□ ۱۱-۶-۱۷ وسط چرخ دنده باریکی $۴۵R_C$ سختی دارد. این چرخ دنده از فولاد ۴۰۶۸ ساخته شده که در شکل ۱۱-۶-۸ دیده می شود. اگر از فولاد ۱۰۴۰ ساخته شده بود سختی آن چقدر بود؟

جواب: $۲۴R_C$

□ ۱۱-۶-۱۸ دو میله استوانه ای به قطر ۷۶mm یکی در آب به هم زده شده و دیگری در روغن به هم زده شده، آب داده شده است. سختیهای عرضی زیر به دست آمده است:

فاصله از سطح آب، R_C روغن، R_C

		mm
۴۰	۵۷	۰
۳۳	۴۶	۹٫۵
۳۲	۳۶	۱۹
۳۱	۳۴	۲۸٫۵
۳۰	۳۳	۳۸

منحنی سختی پذیری به دست آمده از آزمایش آب دادن همین فولاد را محاسبه و رسم کنید (دانه بایی: فقط یک منحنی وجود خواهد داشت.)

□ ۱۱-۶-۱۹ سختی سطح میل گردی از فولاد ۱۰۴۰ که در روغن به هم زده شده آب داده شد R_C ۴۰ است، سختی مرکز میله استوانه ای از فولاد ۴۰۶۸ که قطر آن دو برابر میله ۱۰۴۰ است و در آب، آب داده شده است را معین کنید. (تمام مراحل راه حل را نشان دهید.)

□ ۱۱-۶-۲۰ میله ای فولادی به قطر ۴۰mm، از فولاد ۴۰۱۷، کربن دهی شده تا کربن در سطح آن به ۰٫۶٪ و در ۲ میلی متری زیر سطح به ۰٫۳٪ و در ۵ میلی متری زیر سطح به ۰٫۱۷٪ رسیده است. تغییرات سختی میله فولادی را پس از آب دادن در آب معین کنید.

۱۱-۶-۲۱ مثال ۱۱-۶-۵ را با آب دادن در روغن تکرار کنید.

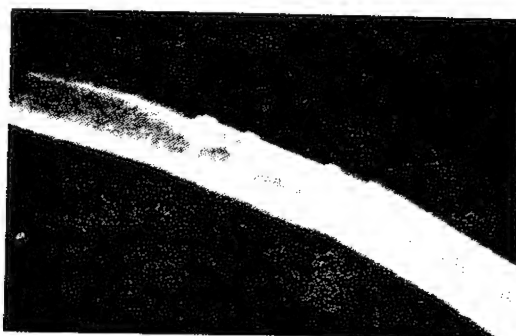
جواب: (الف) R_C ۳۲: S: R_C ۲۸ ~ : ۲mm: R_C ۲۳: R_C ۳: MR: R_C ۲۱: C

خوردگی فلزات

چشم انداز فصل

می دانیم که خوردگی فلزات را از بین می برد. اهمیت خوردگی را از آنجایی توان دریافت که در حدود ۵٪ در آمد سالانه کشورهای مرفعی به طور مستقیم یا غیر مستقیم صرف نگهداری، تعمیر یا تعویض قطعات می شود. روستترین نمونه آن خوردگی در اتومبیل است بخصوص اگر روی جاده نمک پاشیده باشند. علاوه بر این مسائل مهم دیگری نیز ایجاد می کند که از نگهداری پلها تا لوله کشی منازل و از قطعات فلزی که در بدن به کار می روند (شکل ۱۲-۱-۱) تا کابل های کشیده شده روی اقیانوس اطلس را در بر می گیرد.

اگر اتومبیل یا وسیله نقلیه دیگری داریم و آن را در گاراژ نگهداری نمی کنیم، باید انتظار خوردگی آن را داشته باشیم. نمی توان با به کار بردن فلزاتی با کیفیت طلا از خوردگی جلوگیری کرد. زیرا برای ساختن اتومبیل مسوادی محکمتر، ارزانتر و فراوانتر لازم است. ولی اگر طراح فنی با علل خوردگی و روشهای کاهش آن آشنا شود میزان خوردگی را می تواند به حداقل برساند.



شکل ۱۲-۱-۱ قطعات فلزی در بدن. این پیچها و ورق فلزی کسه برای ثابت نگه داشتن استخوان به کار رفته‌اند باید در محیط پیچیده بافت‌های بدن در مقابل خوردگی مقاوم باشند، بی آنکه (۱) استحکام آنها کم شود و (۲) ذرات مضر وارد بدن سازند.

هدف از مطالعه

۱. یادآوری مطالب خوانده شده در شیمی به طوری که بتوانید محاسبات ساده مربوط به جریانه‌های الکتریکی و خوردگی (یا آبکاری که «عکس خوردگی» است) را انجام دهید.
۲. درک اهمیت پتانسیل الکتروود در غلظت استاندارد (۱ مولی)، و توانایی محاسبه پتانسیل برای غلظت‌های دیگر (معادله نرنست).
۳. افزایش اطلاعات شما در شیمی برای مطرح کردن واکنش‌های کاند و آند و در نهایت سلول‌های گالوانی.
۴. آشنا شدن با عواملی مثل قطبی کردن و اثر ناپذیرسازی که بر سرعت خوردگی اثر می‌گذارند.
۵. تشخیص راه‌حلهای مهندسی برای کاهش یا از بین بردن خوردگی زیاد.

۱-۱۲ آبکاری برقی: عکس خوردگی

این فرایند متداول عکس خوردگی است. یونهای فلزی هر کدام یک الکترون می‌گیرند و اذ الکترولیت جدا می‌شوند تا اتم فلزی M را تولید کنند

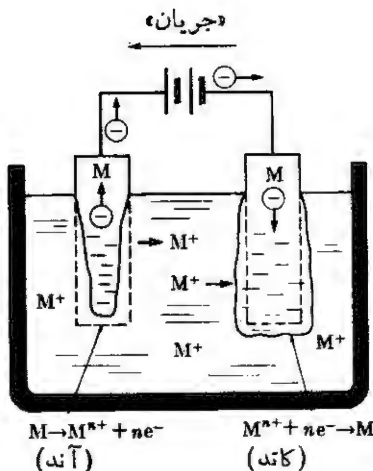


چون هر الکترون باری معادل 1.6×10^{-18} آمپر-ثانیه یا کولن حمل می کند، به سادگی می توان جریان لازم برای آبکاری فلز با سرعت معین را محاسبه کرد. هر مول $(10^3 \times 96500)$ از یونهای یک ظرفیتی، $(1.6 \times 10^{-18} \times 96500)$ کولن بر الکترون $(10^3 \times 96500)$ برای رسوب دادن 10^3 گرم نقره از محلول Ag^+ ، باید جریان ۱ آمپر را به مدت ۹۶۵۰۰ ثانیه به کار برد (زمان و جریان می توانند تغییر کنند ولی حاصل ضرب آنها باید ۹۶۵۰۰ آمپر-ثانیه باشد).

برای آبکاری برقی یک الکترولیت، دو الکتروود و یک منبع الکترون لازم است. در عمل الکترونها به وسیله منبع جریان مستقیم به یکی از الکتروودها داده می شوند. ولی در واقع الکتروود دوم الکترون تولید می کند (شکل ۱۲-۱-۲). در این شکل الکتروود سمت راست یعنی کاتد از یک مدار خادجی الکترون دریافت می کند، واکنش $(1-1-12)$ انجام می شود و آبکاری صورت می گیرد. با ادامه عمل، الکتروود سمت چپ یا آند از طریق باتری، که به عنوان «بمپ» عمل می کند، به مدار خادجی الکترون می فرستد. الکترونها از اتمهای فلزی الکتروود سمت چپ جدا شده، اتمها اکسید می شوند و به تراز ظرفیتی بالاتر می رسند



بدین ترتیب آند خورده می شود.



شکل ۱۲-۱-۲ آبکاری برقی الکترونها از طریق باتری به کاتد می روند و رسوب در آنجا تشکیل می شود (رابطه ۱-۱-۱۲). با وجود این منبع نهایی الکترونها فلزی است که در آند قرار دارد و طبق رابطه $(2-1-12)$ خورده می شود.

* این عبارات که به صورت ایرانیك نوشته شده اند در مورد آند و کاتد تمام مدارهای برقی صدق می کند، حتی در لامپهای تلویزیون که الکتروودهایی دارند که از نظر شیمیایی خنثی هستند. در واکنشهای الکتروشیمیایی همیشه آند است که خورده می شود.

مثال ۱-۱۲-۱ در يك فرايند آبکاری (مثل شكل ۱-۱۲-۲) در هر ساعت بايد ۱۰۰ گرم مس روی سطح 2500 mm^2 رسوب کند. الف) اگر بازده عمل کامل باشد چگالی جريان، i ، چقدر است؟ ب) چقدر مس از آنند خورده می شود؟

حل:

$$\text{الف)} \quad 100 \text{ g/mm}^2 = 100 \text{ g} / [(2500 \text{ mm}^2) (\text{مول} / 63.54 \text{ g})] = 0.00063$$

$$(\text{مول} / 10^4 \text{ Cu}^{++} \times 0.06) (\text{مول} / \text{mm}^2) = 0.00063 \text{ مول} / \text{mm}^2$$

$$\times (\text{Cu}^{++} / \text{الكترون} \times 2)$$

$$= 7.55 \times 10^{20} \text{ الكترون} / \text{mm}^2$$

$$(\text{الكترون} / 10^{-18} \text{ coul} \times 0.16) (\text{الكترون} / \text{mm}^2) = 7.55 \times 10^{20} = \text{كولن لازم}$$

$$= 121 \text{ coul/mm}^2$$

$$(\text{چگالی جريان} = (121 \text{ amp} \cdot \text{sec/mm}^2) (3600 \text{ sec}))$$

$$= 0.034 \text{ amp/mm}^2$$

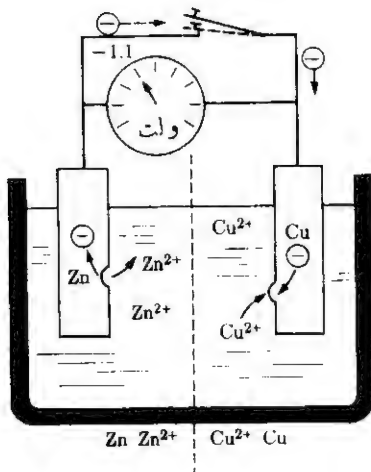
ب) همان مقدار مس (۱۰۰ گرم) از آنند خورده شده و به صورت یون Cu^{2+} در الکترولیت ظاهر می شود.

توضیح: معمولاً بازده عمل آبکاری به علت واکنشهای جنبی، بیش از چند درصد نیست، مثلاً برخی الکترولیتها ممکن است با یونهای H^+ موجود در مجاورت آنند، گاز H_2 تشکیل دهند. ▲

۱-۲-۲ جفت گالوانی (پیل گالوانی)

با وجود آنکه واکنش در آنند (الکتروود سمت چپ شكل ۱-۱۲-۲) خوردگی را نشان می دهد ولی این يك نمونه است زیرا به وسیله باتری انجام می شود و در ضمن دو الکتروود یکسان اند. در حالت عادی، خوردگی تحت شرایطی که دو الکتروود مختلف باشند اتفاق می افتد، یعنی يك جفت گالوانی تشکیل می شود. برای توضیح این پدیده شكل (۱-۲-۱۲) را که در آن يك الکتروود از روی و دیگری از مس است در نظر بگیرید. هر دو فلز اکسید می شوند

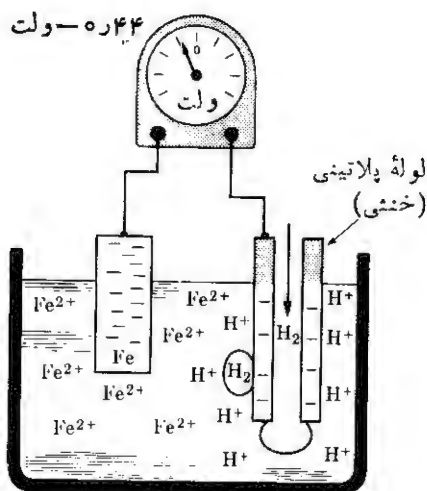




شکل ۱۲-۲-۱ پیل گالوانی (Cu-Zn).
با بسته شدن کلید، روی الکترودهایی از طریق مدار خارجی به مس منتقل می‌کند. هنگامی که مدار باز باشد، اختلاف پتانسیل ۱٫۱ ولت به وجود می‌آید (جدول ۱۲-۲-۱، با محلولهای مولی).

همچنان که طول پیکانها نشان می‌دهد، واکنش روی در مقایسه با واکنش مس تمایل بیشتری برای حرکت به سمت راست دارد. بنابراین اگر دو فلز فقط با یک ولت سنج به هم متصل شوند، دستگاه اختلاف ولتاژی را نشان می‌دهد. اگر الکترولیت مورد استفاده استاندارد (۱ مولی) و دمای آن 25°C باشد، این اختلاف ۱٫۱- ولت خواهد بود. این بدان معنی است که اگر ولت سنج در مدار فرعی قرار گیرد، الکترودها از الکترود روی به مدار خارجی جریان می‌یابند و مس این الکترودها را از مدار خارجی دریافت می‌کند. با جدا شدن الکترودها از آند، رابطه (۱۲-۲-۱) به طرف راست می‌رود و روی بیشتری اکسید می‌شود. به عبارت دیگر روی خورده می‌شود. در این میان الکترودهایی که به کاتد می‌رسند بیش از الکترودهایی اند که طبق رابطه (۱۲-۲-۲) از آن جدا می‌شوند. این الکترودها با یونهای مس موجود در الکترولیت واکنش انجام می‌دهند و رابطه (۱۲-۲-۲) معکوس می‌شود، تا رابطه (۱۲-۱-۱) انجام گیرد. به این ترتیب خوردگی فقط در یکی از الکترودهای جفت گالوانی یعنی در آند اتفاق می‌افتد.

پتانسیل الکترود. تولید یون و الکترود در واکنشهایی مانند رابطه (۱۲-۲-۱) پتانسیلی به وجود می‌آورد که پتانسیل الکترودی نامیده می‌شود و به دو عامل بستگی دارد: (۱) ماهیت فلز و (۲) ماهیت محلول. تمام فلزات به طور یکسان اکسید و به یون و الکترود تبدیل نمی‌شوند؛ دو معادله اول این بخش نشان دهنده این اختلاف اند به علاوه، اتمهایی که در مردانه‌ها هستند نسبت به اتمهای شبکه بلوری پایداری کمتری دارند (بخش ۴-۴)، و بنابراین راحت تر یونیده می‌شوند. همچنین اگر یونهای فلزی وارد محلولی شوند که در آن نسبتاً پایداری دارند، واکنش رابطه (۱۲-۲-۱) با پتانسیل الکترود بیشتری به تعادل می‌رسد (مثلاً یونهای مثبت روی در محلول غلیظ Cl^- پایداری دارند تا در محلول رقیق Cl^-).



شکل ۱۲-۲-۲ اختلاف پتانسیل بین Fe و H_2 . آهن در مقایسه با H_2 پتانسیل الکترونی کمتری تولید می کند (جدول ۱۲-۲-۱ ستون وسط را با توجه به علائم الکتروشیمیایی ببینید). بنا بر این آهن آند و هیدروژن کاتد است. (پلاتین عنصر کاتدی نیست زیرا یون Pt^{4+} وجود ندارد که الکترون دریافت کند.)

پتانسیل الکترونی تمام فلزات (و بنا بر این تمایل آنها به خوردگی) را با اندازه گیری اختلاف ولتاژ بین آن فلز و یک الکتروود هیدروژن استاندارد تعیین می کنند. طبق روابط (۱۲-۱-۱) و (۱۲-۱-۲) واکنش الکتروشیمیایی آهن به صورت زیر است



هیدروژن طبق واکنش زیر به تعادل می رسد



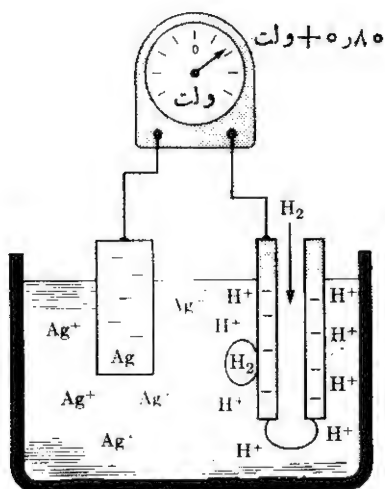
اختلاف پتانسیل بین الکتروودهای آهن و هیدروژن ۴۴-ولت است (شکل ۱۲-۲-۲). نتیجه اندازه گیریهای مشابه برای فلزات دیگر در جدول ۱۲-۲-۱ آمده است. در فلزات قلیایی و قلیایی خاکی الکترونهای مدار آخر نسبتاً آزادند و اختلاف پتانسیل آنها نسبت به هیدروژن از آهن بیشتر است. بعکس فلزات نجیب مثل نقره، پلاتین و طلا در انتهای دیگر جدول پتانسیل الکتروشیمیایی قرار دارند (شکل ۱۲-۲-۳ و جدول ۱۲-۲-۱).

پتانسیلهای الکتروود (محلولهای رقیق). معمولاً با محلولهای یک مولی (جدول ۱۲-۲-۱) برخورد نمی کنیم، تقریباً همیشه الکترولیت رقیقتر است. اثر غلظت یون فلزی C روی پتانسیل الکترونی E بدراحتی توسط معادله نرنست محاسبه می شود، که در $25^\circ C$ معمولاً به صورت زیر نوشته می شود

جدول ۱۲-۱ پتانسیل الکتروود (محلولهای ۱-مولی در ۲۵°C).

پتانسیل الکتروود که در «شیمی فیزیک» و ترمودینامیک به کار می رود.* (ولت)	پتانسیل الکتروود که در الکتروشیمی و مهندسی خوردگی به کار می رود.* (ولت)	واکنش نیم پیل آند (برای واکنش نیم پیل کاتد جهت پیکان عکس می شود)
-۱٫۵۰	+۱٫۵۰	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$
-۱٫۲۳	+۱٫۲۳	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
-۱٫۲۰	+۱٫۲۰	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$
-۰٫۸۰	+۰٫۸۰	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$
-۰٫۷۷	+۰٫۷۷	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$
-۰٫۴۰	+۰٫۴۰	$2(\text{OH})^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$
-۰٫۳۴	+۰٫۳۴	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$
۰٫۰۰	۰٫۰۰	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
+۰٫۱۳	-۰٫۱۳	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$
+۰٫۱۴	-۰٫۱۴	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$
+۰٫۲۵	-۰٫۲۵	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$
+۰٫۴۴	-۰٫۴۴	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
+۰٫۷۴	-۰٫۷۴	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$
+۰٫۷۶	-۰٫۷۶	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$
+۱٫۶۶	-۱٫۶۶	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$
+۲٫۳۶	-۲٫۳۶	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$
+۲٫۷۱	-۲٫۷۱	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$
+۲٫۹۲	-۲٫۹۲	$\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + \text{e}^-$
+۲٫۹۶	-۲٫۹۶	$\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$

* انتخاب علائم اختیاری است. از آنجا که موضوع مورد بحث خوردگی است. ستون وسط را به کار خواهیم برد.



شکل ۱۲-۲-۳ اختلاف پتانسیل بین H_2 و Ag . هیدروژن نسبت به نقره، پتانسیل الکترونی کمتری تولید می کند (جدول ۱۲-۲-۱، ستون وسط را با توجه به علائم الکتروشیمیایی ببینید). و بنا بر این هیدروژن آند و نقره کاتد است.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \left(\frac{0.0257 \text{ V}}{n} \right) (\ln C). \quad * (الف, ۱۲-۲-۵)$$

پتانسیل استاندارد ۱- مولی، \mathcal{E}_0 ، از جدول ۱۲-۲-۱ به دست می آید. حرف n تعداد الکترونهاى از دست رفته هر یون است، مثلاً در رابطه (۱۲-۲-۱) برای Zn^{2+} ، $n=2$ است. در محلولهای رقیق، C کمتر از یک مول در لیتر و $\mathcal{E} < \mathcal{E}_0$ است، زیرا رابطه (۱۲-۲-۵) طوری نوشته شده است که با علائم به کار رفته در محاسبات خوردگی (ستون وسط جدول ۱۲-۲-۱) مطابقت کند.

* معادله (۱۲-۲-۵، الف) از معادله شیمیایی زیر به دست می آید

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \left(\frac{kT}{n} \right) \ln \mathcal{K} \quad (الف, ۱۲-۲-۶)$$

که در آن k برابر با $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ، $T = 298 \text{ K}$ و ثابت تعادل قانون جرم است. بنا بر این می توان معادله (۱۲-۲-۵، الف) را به صورت زیر تبدیل کرد

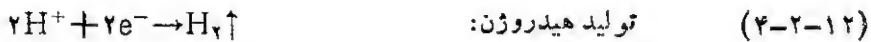
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \left(\frac{0.0257 \text{ V}}{n} \right) \left(\frac{T}{298 \text{ K}} \right) \ln C \quad (ب, ۱۲-۲-۶)$$

و بنا بر این تغییر دما را در نظر گرفت.

بر حسب لگاریتم مبنای ۱۰ معادله (۱۲-۲-۵، الف) به صورت زیر در می آید

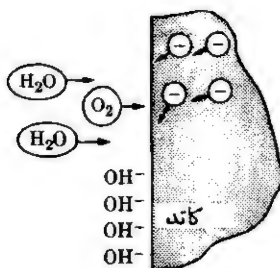
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \left(\frac{0.059 \text{ V}}{n} \right) \log C \quad (ب, ۱۲-۲-۵)$$

واکنشهای کاتدی. در مورد خوردگی، مهمترین واکنشی که در آن انجام می شود رابطه (۱۲-۱-۲) است، ولی انواع واکنشهای کاتدی باید مورد توجه قرار گیرند. زیرا هر واکنش مصرف کننده الکترون (کاتدی) همیشه باید واکنش آنودی خوردگی (واکنش تولید کننده الکترون) همراه است. مهمترین واکنشهای کاتدی عبارت اند از

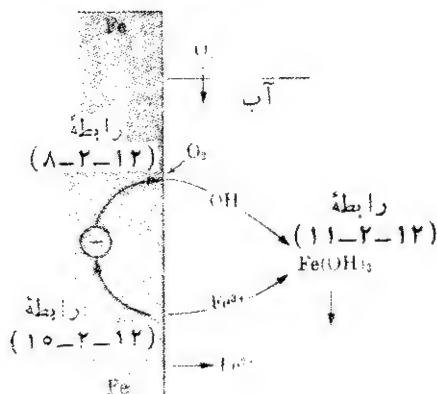


همه واکنشها الکترون می گیرند. بسته به شرایط الکترولیت از قبیل غلظت و دما، یکی از این واکنشها غلبه خواهد کرد. واضح است که برای شروع نخستین واکنش از پنج واکنش فوق، یسونهای فازی باید موجود باشند. به علاوه با زیاد شدن غلظت یون-فلز، این یونها بیشتر الکترونها را در کاتد مصرف می کنند. این مطلب در مورد پیلهای غلظتی مورد توجه خواهد بود. واکنش (۱۲-۲-۹) به وجود اکسیژن و pH کم (یعنی محلول اسیدی) احتیاج دارد. واکنش (۱۲-۲-۸) در صورت وجود اکسیژن، در محیطهای قلیایی یا خنثی پرديگران غلبه خواهد کرد (شکل ۱۲-۲-۴). این واکنش به هنگام بحث در مورد پیلهای اکسایشی حائز اهمیت است. واکنش (۱۲-۲-۷) در شرایطی که اکسیژن آزاد وجود نداشته باشد، و بخصوص در صورت وجود گوگرد یا دیگر مواد گیرنده هیدروژن به وقوع می پیوندد.

رنگ. شکل ۱۲-۲-۵ طرحواره مکانیسم زنگ زدن آهن را نشان می دهد. بتانسیل الکترون آهن ϕ مطابق جدول (۱۲-۲-۱) وقتی Fe^{2+} تشکیل دهد، برابر ۴۴۰ ولت است (در واقع اگر بتواند الکترون بگیرد، بیشتر اکسید می شود و Fe^{3+} تشکیل می شود).

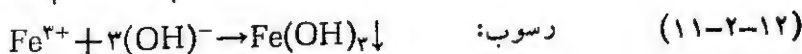
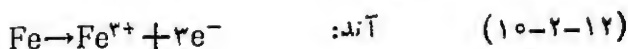


شکل ۱۲-۲-۴ تشکیل هیدروکسید در کاتد. سرعت واکنش (۱۲-۲-۸) با افزایش مقدار اکسیژن بالا می رود. این عمل در کاتد که الکترونها جذب می شوند انجام می گیرد. اگر به وسیله یک جریان مستقیم عکس شده، الکترونهای تخلیه می شوند، رابطه ۱۲-۲-۸ عکس شده و اکسیژن آزاد می شود (مسئله ۱۲-۲-۴ را مطالعه کنید).



شکل ۵-۲-۱۲ تشکیل زنگ. اکسایش آهن، الکترون و یون آهن تولید می کند که در کاتد با اکسیژن و آب ترکیب می شوند (رابطه ۸-۲-۱۲) و یونهای (OH)⁻ تشکیل می دهند. زنگ شامل ترکیبی از یونهای (OH)⁻ و Fe^{۲+} است.

با توجه به اینکه رابطه (۸-۲-۱۲) کاتدی و الکترون گیرنده است، در آب پر اکسیژن واکنشهای زیر انجام می شود



محصول نهایی هیدرات شکل، Fe(OH)_۳، در آب نامحلول است و بنابراین رسوب می کند. این زنگ است که روی آهن در مجاورت هوا تشکیل می شود؛ برای تشکیل آن حتی همان لایه رطوبت جذب شده به عنوان الکترولیت کافی است.

مثال ۱-۲-۱۲ پیل استاندارد (۱-مولار، ۲۵°C) ساخته شده است که در آن واکنش آندی رابطه (۱-۲-۱۲) و واکنش کاتدی رابطه (۸-۲-۱۲) است. بین دو الکترود چه پتانسیلی به وجود می آید؟

حل: از جدول ۱-۲-۱۲ (که در آن $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^- = 0.00 \text{ V}$)، دو واکنش آندی عبارت اند از



$$\text{اختلاف} = -1.16 \text{ V}$$

توضیح. از آنجا که رابطه (۸-۲-۱۲) در جدول (۱-۲-۱۲) بالای رابطه (۱-۲-۱۲) قرار دارد، واکنش مربوط به کاتد می شود؛ و جهت آن عکس شده و به واکنش گیرنده الکترون تبدیل می شود.

مثال ۱۲-۲-۲ پتانسیل الکتروود کرم (نسبت به هیدروژن) را در محلولی کسه در هر لیتر حاوی ۲ گرم یون Cr^{2+} است، تعیین کنید.

حل: از آنجا که وزن اتمی کرم ۵۲ گرم است

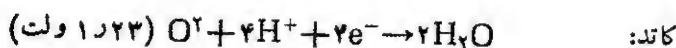
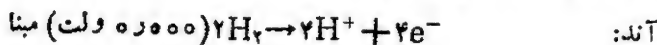
$$C = \frac{2 \text{ g/l}}{52 \text{ g/mole}} = 0.0385 \text{ M}$$

$$E = -0.74 \text{ V} + \frac{0.0257 \text{ V}}{2} (\ln 0.0385)$$

$$= -0.78 \text{ V}$$

مثال ۱۲-۲-۳ توضیح دهید که با استفاده از هیدروژن و اکسیژن چگونه می توان یک پیل سوختی را به کار انداخت.

حل: الکترونها باید از هیدروژن جدا شده و از طریق مدار خارجی برگردند تا با اکسیژن ترکیب شوند. واکنشهای نیم پیل عبارت اند از

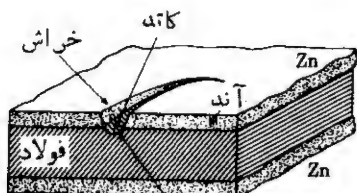


بنابراین با وجود الکتروولت ۱- مولار استاندارد، از نظر تئوری، باید پیل ۱.۲۳ ولتی تشکیل شود. برای این کار الکترودها باید رسانا، از نظر شیمیایی بی اثر، و متخلخل باشند تا گاز را بتوان در آنها تغذیه کرد.

۱۲-۳ انواع پیل های گالوانی

پیل های خوددگی گالوانی را می توان به سه گروه مختلف تقسیم کرد: (۱) پیل های ترکیبی، (۲) پیل های تنشی، و (۳) پیل های غلظتی. هر کدام از این پیل ها خوردگی ایجاد می کنند زیرا یک نیمه از جفت تشکیل شده به عنوان آند و نیمه دیگر به عنوان کاتد عمل خواهد کرد. فقط آند خورده می شود و آن هم در صورتی است که با کاتد اتصال الکتریکی داشته باشد. اگر فقط آند وجود داشته باشد، به سرعت با محیط موجود به تعادل می رسد (رابطه ۱۲-۲-۳ را که در آن فقط آهن موجود است ببینید).

پیل های ترکیبی. بین هر دو ماده متفاوت ممکن است پیل ترکیبی به وجود آید. در هر حال، فلزی که در مجموعه محرکه الکتریکی، مطابق آنچه در جدول ۱۲-۲-۱ آمده است، پایینتر قرار دارد به عنوان آند عمل خواهد کرد. مثلاً در ورق فولاد دوپینه کاری شده (شکل ۱۲-۳-۱)، روکش روی حتی اگر سطح آهن را به طور کامل پوشاند به عنوان آند عمل



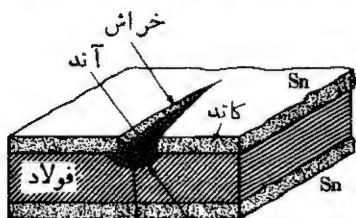
از خوردگی محافظت می‌شود

شکل ۱۲-۳-۱ فولاد رویینه کاری شده
(سطح مقطع). روی به عنوان آند و آهن موجود در فولاد به عنوان کاتد عمل می‌کند. بنابراین حتی در نقاطی که روی خراشیده شده است، آهن محافظت می‌شود.

و آهن زیر آن را محافظت می‌کند، زیرا آهن نقش کاتد را دارد و خورده نمی‌شود. بنابراین هر نوع خوردگی در آند یعنی سطح روی اتفاق می‌افتد. مادام که روی وجود دارد آهن مجاور را محافظت می‌کند.

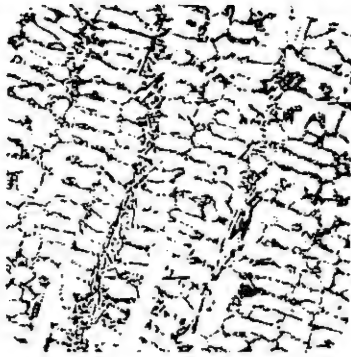
برعکس اگر قلع به عنوان روکش برای ورقهای فولادی یا آهنی به کار رود، فقط تا زمانی از خوردگی جلوگیری می‌شود که سطح فلز کاملاً پوشانده شده باشد. ولی اگر در روکش شیاری پدید آید، قلع نسبت به آهن کاتد و آهن آند می‌شود (شکل ۱۲-۳-۲). جفت گالوانی حاصل موجب خوردگی آهن می‌شود. از آنجا که آندی با سطح کوچک باید به کاتدی با سطح وسیع الکترون بدهد، خوردگی موضعی و بسیار سریع خواهد بود.

نمونه‌های دیگری از جفت گالوانی که اغلب با آن برخورد می‌کنیم عبارت‌اند از: (۱) پیچهای فولادی در قطعات برنجی کشتی، (۲) لحیم «Pb-Sn» اطراف سیم مسی، (۳) محور فولادی پروانه در یاتاقانهای مفرغی، و (۴) لوله فولادی که در لوله کشتی به لوله مسی متصل می‌شود. هر یک از اینها می‌تواند پیل گالوانی باشد و باید از محیط خورنده حفظ شود. بسیاری از مهندسان تشخیص نمی‌دهند که محل اتصال دو فلز مختلف منبع بالقوه برای خوردگی گالوانی است. اخیراً در یک مورد مهم، از یاتاقان برنجی در مکانیسم همزن هیدرولیکی فولادی استفاده شده بود، و با وجود آنکه محیط روغن بود فولاد به عنوان آند عمل کرده به قدری خورده شده بود که از میان اتصالات روغن نشت می‌کرد. پیلهای گالوانی می‌توانند ابعاد میکروسکوپی داشته باشند. زیرا هر فاز ترکیب و ساختار خود را دارد بنابراین هر یک دارای پتانسیل الکتروود ویژه‌ای است در نتیجه اگر آلیاژ دو فاز در معرض الکترولیت قرار گیرد، پیل گالوانی به وجود خواهد آمد. مثلاً در پرلیت شکل ۹-۸-۱ لایه‌های کاربید به این دلیل مشخص می‌شوند که کاربید در الکترولیتی



توسط محیط خورنده، محصولات خورده شده است خوردگی

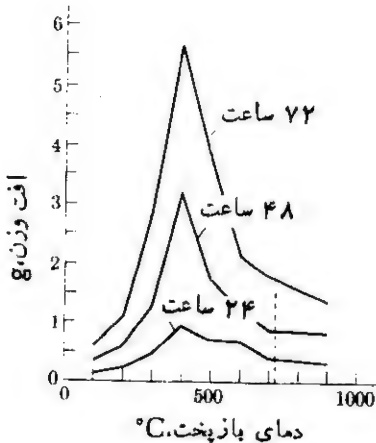
شکل ۱۲-۳-۲ حلبی (سطح مقطع). قلع فقط در صورتی آهن را محافظت می‌کند که کاملاً سطح آن را پوشانده باشد. هرگاه روکش بشکند آهن موجود در فولاد به عنوان آند عمل می‌کند و سریعاً خورده می‌شود.



شکل ۱۲-۳-۳ میکروپیل‌های گالوانی (آلیاژ Al-Si). آلیاژهای دوفازی بیشتر از آلیاژ تک‌فاز در معرض خوردگی قرار می‌گیرند. آلیاژ دوفازی آند و کاتد تشکیل می‌دهد.

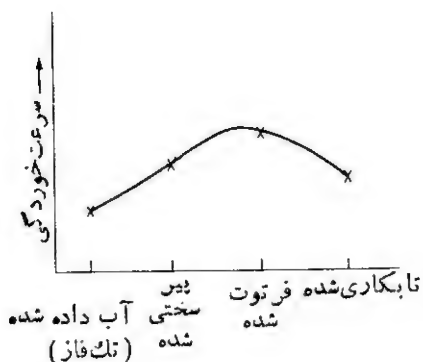
که به عنوان محلول حک کاری به کار می‌رود به عنوان آند عمل می‌کند. * شکل ۱۲-۳-۳ میکروساختار آلیاژ ریختگی «Al-Si» را نشان می‌دهد. در اینجا نیز مشخص شدن دوفاز به خوردگی بستگی دارد. یکی از فازها آند و دیگری کاتد است.

عملیات گرمایی می‌تواند با تغییر میکروساختار فلز، بر سرعت خوردگی اثر بگذارد. شکل ۱۲-۳-۴ اثر بازپخت را روی خوردگی فولاد آب داده شده نشان می‌دهد. قبل از واکنشهای بازپخت، فولاد شامل تک‌فاز مارتنزیت است. بازپخت مارتنزیت تعداد زیادی پیل گالوانی و مرز دانه‌های فریت و کاربید تولید می‌کند و سرعت خوردگی را افزایش می‌دهد. در دماهای بالاتر، به هم پیوستن ذرات کاربید تعداد پیل‌های گالوانی و تعداد



شکل ۱۲-۳-۴ میکروپیل‌ها و خوردگی. پس از آبدادن فقط مارتنزیت وجود دارد. پس از بازپخت در دماهای متوسط به دلیل وجود ساختار ریز (کاربید + α) تعداد زیادی پیل گالوانی کوچک وجود خواهد داشت. با بازپخت در دماهای بالا، ذرات کاربید انباشته شده و تعداد پیل‌های گالوانی کم می‌شود.

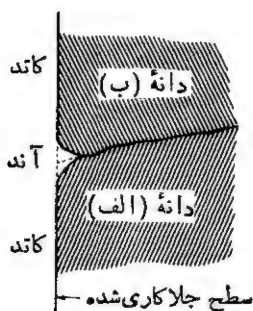
* محلول حک کاری پیکرال ۴٪ بوده است. کاربیدها تیره می‌شوند زیرا مواد حاصل از واکنش در سطح باقی می‌مانند. پتانسیل الکترود فریت و کاربید آنقدر به هم نزدیک است که اگر در الکترولیت‌های دیگری قرار گیرند، نقش کاتدی و آندی آنها ممکن است با هم عوض شود.



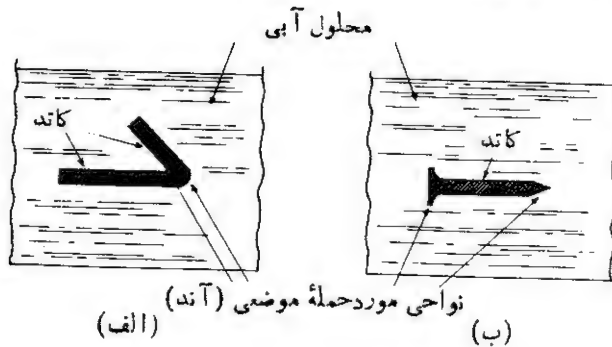
شکل ۱۲-۳-۵ پیرسختی و خوردگی (طرحواره). در آلیاژ آب داده شده تک فاز سرعت خوردگی کمتر از مراحل دو فازی بعدی است.

مرزدانه‌ها را کم می‌کند و بدین ترتیب سرعت خوردگی به طور قابل توجهی کم می‌شود. در آلیاژ تک فاز آلومینیم که قابلیت پیرسختی دارد، سرعت خوردگی کم است (شکل ۱۲-۳-۵)، ولی هنگامی که فاز دوم رسوب می‌کند، سرعت خوردگی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. انباشتگی بیشتر رسوب یا دیگر سرعت خوردگی را کمتر می‌کند ولی این سرعت هیچگاه به کمی سرعت خوردگی در آلیاژ تک فاز نمی‌رسد. آلیاژ فرتوت شده دارای بیشینه سرعت خوردگی است.

پیل‌های تنشی. همان طور که در شکل ۴-۳-۹ دیده می‌شود وقتی مرزدانه‌ها حاک کاری (یعنی خورده) می‌شوند، پتانسیل الکتروکاتدهای مرزدانه‌ها با اتمهای دانه‌ها فرق دارد بنابراین آن‌د و کاتد به وجود می‌آید (شکل ۱۲-۳-۶). مرزدانه‌ها را می‌توان نواحی تحت تنش به شمار آورد زیرا اتمها در موقعیتی نیستند که کمترین انرژی را داشته باشند. اثر تنشهای داخلی روی خوردگی، پس از سردکاری فلز نیز معلوم است. شکل ۱۲-۳-۷ (الف) نمونه بسیار ساده‌ای را نشان می‌دهد که در محل خم شده میله‌ای که قبلاً تابکاری شده کرنش سختی وجود دارد. ناحیه‌ای که شدیداً سردکاری شده به عنوان آن‌د و سایر نواحی



شکل ۱۲-۳-۶ خوردگی مرزدانه‌ای. چون اتمهای مرزدانه‌ها انرژی بیشتری دارند، مرزدانه‌ها به عنوان آن‌د عمل می‌کنند. (به شکل ۴-۳-۹ رجوع کنید).



شکل ۱۲-۳-۷ پیل تنشی. در این دونه‌نمونه کرنش سختی، نواحیی که بیشتر سردکاری شده‌اند آندند. پتانسیل الکتروود فلز تغییر شکل یافته بیشتر از فلز نابکاری شده است.

تغییر نیافته به عنوان کاتد عمل می‌کنند.*
اثرات تنش روی خوردگی در مهندسی اهمیت بسیاری دارد. اگر قطعه‌ای در محیط خوردنده‌ای به کار می‌رود، وجود تنش می‌تواند سرعت خوردگی را تا حد زیادی افزایش دهد.

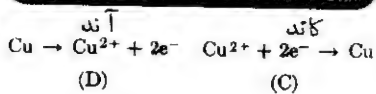
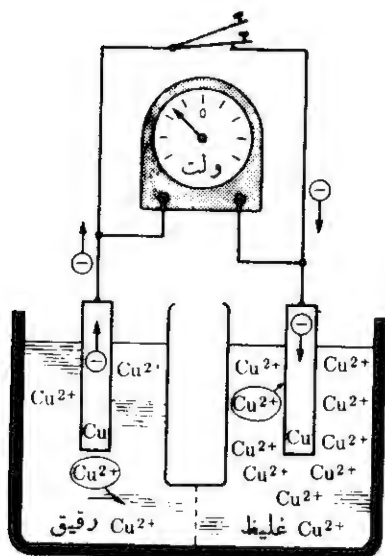
پیل‌های غلظتی. طبق معادله نرنست (۱۲-۲-۵)، هر الکتروود در الکتروولیت رقیق نسبت به همان الکتروود در الکتروولیت غلیظ، آندی است. این موضوع را می‌توان بسا استفاده از شکل ۱۲-۳-۸ و رابطه (۱۲-۳-۱) نشان داد



فلز طرف (د) شکل در محلول رقیقتر Cu^{2+} قرار دارد بنابراین واکنش (۱۲-۳-۱) به راحتی به طرف راست انجام می‌شود. فلز طرف (ج) در محلولی با غلظت بیشتر Cu^{2+} قرار دارد بنابراین واکنش (۱۲-۳-۱) مس را ساده‌تر روی الکتروود پوشش می‌دهد، الکتروودی که در الکتروولیت غلیظ قرار دارد کاتد شده محافظت می‌شود، حال آنکه الکتروود در الکتروولیت رقیق بیشتر خورده شده آند می‌شود.

پیل غلظتی در جایی که غلظت الکتروولیت کمتر است خوردگی را تشدید می‌کند. پیل‌های غلظتی از نوع بالا غالباً در واحدهای شیمیایی و نیز تحت برخی شرایط مربوط

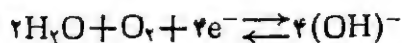
* کتاب خوردگی در عمل که توسط شرکت بین‌المللی نیکل چاپ شده است اثر کارسرد را روی خوردگی گالوانی نشان می‌دهد (با آزمایشات توضیحی).



شکل ۱۲-۳-۸ پیل غلظتی. اگر الکترولیت همگن نباشد، ناحیه رقیقتر آند می‌شود.

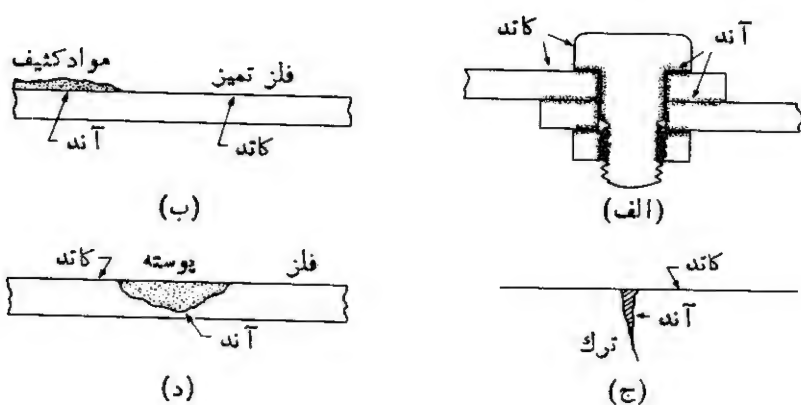
به خوردگی ناشی از جریان سیال بسافت می‌شوند. ولی به‌طور کلی اینها کم‌اهمیت‌تر و غیر معمولی‌تر از نوع اکسایشی پیل غلظتی‌اند. وقتی سطح مرطوب فلزی در معرض اکسیژن موجود در هوا قرار می‌گیرد خوردگی تشدید می‌شود. با این حال خوردگی بیشتر در قسمتی از پیل که کمبود اکسیژن دارد رخ می‌دهد.

این امر غیر عادی را می‌توان بر اساس واکنشهای در سطح کاند، یعنی جایی که الکترونها به مصرف می‌رسند، شرح داد. رابطه (۱۲-۲-۸) بار دیگر در اینجا آمده است، زیرا نقش O_2 را در تشدید خوردگی در نواحی بدون اکسیژن نشان می‌دهد.



از آنجا که این واکنش کاتدی محتاج به اکسیژن، الکترونها را از فلز جدا می‌کند، نواحی مجاور که اکسیژن کمتری دارند، باید الکترونهای بیشتری تولید کنند، پس نواحی کم اکسیژن به عنوان آند عمل می‌کنند.

پیل اکسایشی در محلی که غلظت اکسیژن کمتر است خوددگی را تشدید می‌کند. این مطلب کلی مهم است. خوردگی در محلهایی که ظاهراً در دسترس نیستند مثل ترکها یا شکافها و زیر توده‌های مواد کثیف و سایر آلودگیهای سطحی تشدید می‌شود (شکل ۱۲-۳-۹). زیرا محلهایی که کمبود اکسیژن دارند به عنوان آند عمل می‌کنند و در این مورد خوردگی خود به خود تسریع می‌شود زیرا جمع شدن زنگ یا مواد کثیف



شکل ۱۲-۳-۹ پیل اکسایشی. محل‌هایی که در دسترس نیستند و غلظت اکسیژن در آنها کم است به عنوان آند عمل می‌کنند، زیرا تحرك الکترون‌ها و یون‌های فلزی، از اکسیژن بیشتر است.

دسترسی اکسیژن به فلز را محدود کرده آند به وجود می‌آورد و تجمع این مسوود باز هم بیشتر می‌شود. نتیجه این عمل حفره‌ای شدن موضعی به دلیل خوردگی غیر یکنواخت است [شکل ۱۲-۳-۹ (د)] و عمر مفید قطعه، را بیش از آنچه کاهش وزن نشان می‌دهد کم می‌کند.

مثال ۱۲-۳-۱ در دوسر يك سیم مسی، غلظت مس در الکترولیت $0.03M$ و $0.02M$ است. الف) چه پتانسیل الکترودی بین دوسر آن به وجود می‌آید؟ ب) کدام سر آن خورده می‌شود؟
حل:

$$E_{0.03} = +0.34V + \frac{0.0257}{4} (\ln 0.03) = 0.295V \quad \text{الف)}$$

$$E_{0.02} = +0.34V + \frac{0.0257}{4} (\ln 0.02) = 0.260V$$

$$\Delta = 35mV$$

ب) آند در سری است که الکترولیت آن رقیقتر است.

□ ۱۲-۲ سرعت خوردگی

با بررسی جدول ۱۲-۲-۱ پرنسپایی مطرح می‌شود. مثلاً آلومینیم آندیت‌تر از آهن است،

پس چرا کمتر از آهن خورده می‌شود؟ با آنکه کرم با ۳ رده ولت اختلاف نجیبتر از آهن است، چگونه مقاومت فولادهای زنگ‌نزن را در برابر خوردگی زیاد می‌کند؟ برای پاسخ دادن به چنین پرسشهایی باید عواملی که بر چگالی جریان مؤثرند را بررسی کرد.

چگالی جریان. در مدار باز بین آند آهنی و کاتد هیدروژنی (شکل ۱۲-۲-۲) در شرایط استاندارد (جدول ۱۲-۲-۲) اختلاف پتانسیل الکتروود ۰۴۴-۵ است. در واقع یک باتری داریم و اگر دو الکتروود در مداری به هم متصل شوند، جریان ایجاد می‌شود. واضح است که اگر اتصال صورت گیرد، اختلاف پتانسیل کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲-۴-۱ صورت دیگری از شکل ۱۲-۲-۲ است، با این تفاوت که در اینجا مقاومت متغیر و لوله‌ای آهنی برای ایجاد کاتد هیدروژنی وجود دارد. آزمایش نشان می‌دهد که اگر اتصال مستقیمی بین دو الکتروود ایجاد شود ($R=0$) چگالی جریان، i ، روی الکترودها برابر ۲ آمپر بر متر مربع می‌شود که مساوی با جریان I (که توسط آمپرسنج خوانده می‌شود) بر واحد سطح است. این مقدار چگالی جریان خوددگی، i_{co} ، نامیده می‌شود. البته اختلاف پتانسیل، $\Delta\phi$ ، بین دو الکتروود با اتصال مستقیم صفر ولت می‌شود. با افزایش مقاومت، اختلاف پتانسیل افزایش می‌یابد و مطابق شکل ۱۲-۲-۲ در $R=\infty$ به $\Delta\phi = -0.447$ می‌رسد.

برای نشان دادن ارتباط بین چگالی جریان و اختلاف پتانسیل از شکل ۱۲-۴-۲ استفاده می‌شود. اگرچه می‌توان آن را به صورت رابطه ریاضی نیز نشان داد،* ولی توجه ما روی دو منحنی متمرکز خواهد شد. منحنی C برای کاتد و منحنی A برای آند است. منحنیها معمولاً به صورت خطوط مستقیم یکدیگر را در 2 amp/m^2 قطع می‌کنند (البته برای دو الکتروود هیدروژن و آهن و تحت شرایط استاندارد). در $\Delta\phi = 0.2 \text{ V}$ (نقطه‌هایی که در شکل ۱۲-۴-۲ دیده می‌شوند)، چگالی جریان تا ۰۱ آمپر بر متر مربع کاهش می‌یابد.

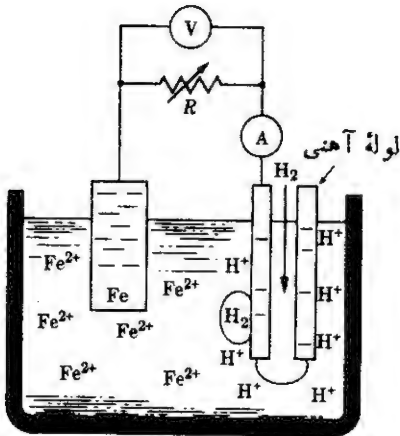
البته در مورد جفتهای دیگر وضعیت فرق می‌کند. مثلاً منحنی A برای روی به طور محسوسی زیر منحنی A برای آهن قرار دارد. در نتیجه اگر در شکل ۱۲-۴-۱ به جای آهن، روی ($i_{co} \approx 105 \text{ amp/m}^2$ برای $\text{Zn}-\text{H}_2$) قرار گیرد، چگالی جریان خوردگی،

* چگالی جریان i طبق رابطه زیر تغییر می‌کند

$$i = i_{co} e^{\phi/B} \quad (12-4-1, \text{الف})$$

که در آن i چگالی جریان تغییر یافته، ϕ پتانسیل اضافی، و B ثابت تافل است (به کتابهای خوردگی مراجعه کنید). به عبارت دیگر

$$\ln i = C + \frac{\phi}{B} \quad (12-4-2, \text{ب})$$

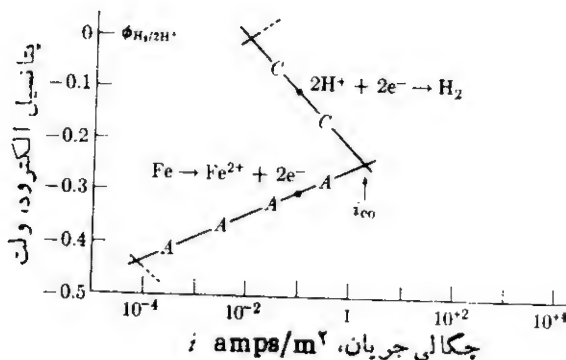


شکل ۱۲-۴-۱ اندازه گیری چگالی جریان (طرح وار) اگر اتصال مستقیم باشد ($R=0$) و بنا بر این $\Delta\phi=0$ ، چگالی جریان خوردگی، i_{co} به وجود می آید. برای این جفت، این چگالی برابر ۲ آمپر بر متر مربع است. اگر مقاومت برای $\Delta\phi=0.2V$ تنظیم شود، (شکل ۱۲-۴-۲) چگالی تا ۱۰ آمپر بر متر مربع کاهش می یابد.

i_{co} خیلی بیشتر خواهد بود. به طور کلی اگر اختلاف پتانسیل الکترومدار باز آند و کاتد بیشتر باشد، منحنیهای آنها یکدیگر را در چگالی جریان بالاتری قطع می کنند. بنا بر این، با استفاده از جدول ۱۲-۲-۱، انتظار داریم که چگالی جریان برای جفت آهن/مس $[\Delta\phi = -(+0.34V - 0.44V)]$ بیشتر از چگالی جریان برای جفت آهن/هیدروژن $[\Delta\phi = -0.44V - 0]$ یا پیل گالوانی آهن/نیکل $[\Delta\phi = -0.44V - (-0.25V)]$ باشد.

در بحثهای بالا فرض شده است که آند و کاتد سطوح مساوی دارند. از آنجا که مساحت آند و کاتد به ندرت با هم مساوی است، چگالی جریان، i ، بیشتری روی الکترودی که سطح کمتری دارد مشاهده می شود. (کل جریان I ، باید برای هر دو الکترودی یکی باشد، زیرا بار الکتریکی ذخیره نمی کنیم.) در صورتی که الکترود کوچکتر آند باشد، خوردگی تا حد قابل ملاحظه ای تشدید می شود. پیچ فولادی را در نظر بگیرید که برخلاف مصلحت، در قطعات برنجی کشتی به کار رفته است یا شکاف شکل ۱۲-۳-۲ را که در «حلی» به وجود آمده است. در هر دو صورت کل تعداد الکترونهاي جریان خوردگی باید با خورده شدن فلز در سطح آند کوچک به وجود آید، بنابراین سرعت خوردگی در آن نقطه بسیار زیاد خواهد بود. خوردگی در ورق فولادی شکل ۱۲-۳-۲ بسیار سریع نفوذ می کند؛ همچنین پیچ فولادی به کار رفته در قطعه برنجی وقتی در آب دریا قرار گیرد در زمان کوتاهی از بین می رود.

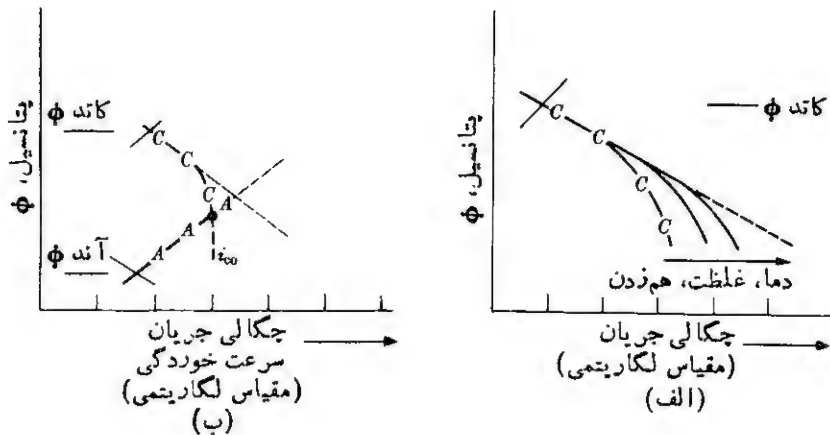
قطبش کاتدی. هنگام پیش بینی جریان خوردگی از شکل (۱۲-۴-۲) می توان فرض کرد که سرعت یونهای که الکتروود را ترك می کنند یا به آن نزدیک می شوند چنان است که برای به وجود آوردن این جریان خوردگی کافی است. این فرض در مورد آند که در



شکل ۱۲-۴-۲ چگالی جریان بر حسب اختلاف پتانسیل (به شکل ۱۲-۴-۱ رجوع شود). وقتی آند و کاتد شکل (۱۲-۴-۱) در تماس مستقیم باشند، جریان خوردگی، i_{co} برابر با ۲ آمپر بر m^2 است. با زیاد شدن اختلاف پتانسیل بین آند A و کاتد C، چگالی جریان کاهشی می یابد. (وقتی اختلاف پتانسیل ۲ ولت $(V) = -0.1$ و $(V) = -0.3$ A باشد چگالی جریان فقط 10^{-2} amp/m² است.)

آن یونهای جدا شده وارد الکترولیت رقیق می شوند کاملاً بجاست (و این حالت متداول خوردگی است). ولی یونهای H^+ ، O_2 حل شده، یا دیگر مواد واکنشگر رقیق می توانند به آسانی ناحیه کاتدی را تخلیه کرده و مسبب تأخیر نفوذی شوند. این حالت قطبش کاتدی نامیده می شود و با اصلاح منحنی کاتد، C، شکل ۱۲-۴-۲، می توان آن را طبق شکل ۱۲-۴-۳ توصیف کرد. در محلولهای راکد با دمای پایین، یا غلظت کم مسود واکنشگر دائماً در دسترس نیستند تا الکترون جذب کنند و چگالی جریان از مقدار پیش بینی شده روی منحنی کاتد عقب می افتد. در نتیجه چگالی جریان خوردگی در نقاط دو منحنی کمتر از مقدار پیش بینی شده است. چون در این حالت خوردگی آهسته تر است می خواهیم چنین حالتی به وجود آید* در نیروگاههای بخار این کار با هواگیری آب تغذیه شده انجام می شود. اما در وضعیتی که در شکل ۱۲-۲ (الف) دیده می شود، به مشکلی بر می خوریم زیرا در حالت راکد خوردگی می تواند قابل اغماض باشد؛ سپس تغییری در محیط از قبیل دما یا حرکت الکترولیت، می تواند «قطبش کاتدی» را به طور ناگهانی کاهش دهد. بنابراین سرعت خوردگی تا حد زیادی تغییر می کند. این امر دلیل بعضی سرعتهای نامنظم خوردگی است که معمولاً در عمل با آن برخورد می کنیم.

* در مورد پیل خشک یا باتری، که خوردگی برای تولید جریان به کار می رود، این حالت مطلوب نیست.

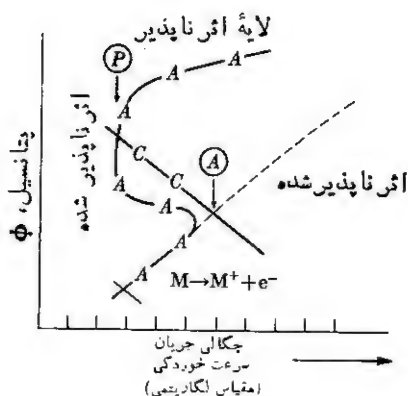


شکل ۴-۳-۱۲ قطبش (الف) وقتی غلظت الکترولیت در کاتد و دما بالا باشد و الکترولیت را کد نباشد، چگالی جریان عادی است (خط چین)، و در غیر این صورت چگالی جریان عقب خواهد بود، (ب) با عقب افتادگی چگالی جریان، جریان خوردگی، i_{co} ، از مقدار پیش‌بینی شده کمتر می‌شود. هرگاه در عمل شرایط محیط چنان تغییر کند که دسترسی به مواد واکنشگر بیشتر شود، این قطبش از بین می‌رود.

اثر ناپذیرسازی در پاراگراف قبل گفته شد که الکترولیت معمولاً نسبت به محصول آند رقیق است، بنابراین معمولاً قطبش آندی اتفاق نمی‌افتد. ولی آند ممکن است به وسیله واکنشهای غیر خورنده از الکترولیت جدا شود. اینها برای کنترل خوردگی بسیار مهم‌اند، زیرا سرعت خوردگی را تغییر می‌دهند.

فرض کنید در شکل ۴-۳-۱۲ به جای آهن، فولاد زنگ‌زن قرار گیرد. در مجاورت اکسیژن اضافی، لایه‌ای از اکسید که شامل کرم است روی سطح آند تشکیل می‌شود و آن را از الکترولیت جدا می‌سازد. با افزایش پتانسیل اکسایش، منحنی چگالی جریان آند، A ، به‌طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (شکل ۴-۳-۱۲). این حالت «اثر ناپذیر شدن» نامیده می‌شود. اثر آن روی سرعت خوردگی مشخص است. زیرا چگالی جریان خوردگی، i_{co} ، ممکن است دهها برابر از A به P کم شود.

اثر ناپذیر شدن فولاد زنگ‌زن به این دلیل است که کرم میل ترکیبی شدیدی با اکسیژن دارد. بدین ترتیب می‌بینیم که در شرایط اکسیدکننده، سرعت خوردگی فولاد زنگ‌زن زیاد نیست (البته صفر هم نیست). به همین ترتیب بسیاری از فلزات در HNO_3 به آرامی خورده می‌شوند و این به دلیل خاصیت اکسیدکنندگی این اسید است. حال آنکه همان فلزات در مجاورت HCl سریعاً خورده می‌شوند زیرا منبعی برای تولید اکسیژن وجود ندارد.



شکل ۱۲-۴-۴ اثر ناپذیر شدن. فلزاتی مانند آلومینیم، تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن در محیط‌های اکسیدکننده لایه محافظ پایداری روی سطح آن‌ها تشکیل می‌دهند. چگالی جریان آن‌ها از مقدار عادی دور می‌شود (خط چین)، بنابراین چگالی جریان خوردگی (محل تلاقی دو منحنی) به‌طور اساسی کم می‌شود. هرگاه لایه اکسید از بین برود، سرعت خوردگی سریعاً از مقدار غیرفعال (P) به مقدار فعال (A) می‌رسد.

آلومینیم و تیتانیم روی سطح خود لایه اکسید محافظ Al_2O_3 و TiO_2 تشکیل می‌دهند. این لایه به قدری محافظ است که چگالی جریان خوردگی تقریباً به صفر می‌رسد و می‌توان قایق آلومینیومی ساخت! * آنسیدی کردن عبارت از فرایندی تجارتي است که پوشش اکسیدی محافظی بر روی آلومینیم ایجاد می‌کند.

مثال ۱۲-۴-۱ چگالی متوسط جریان خوردگی برای آهن 2 amp/m^2 است. الف) در هر سانی متر مربع سطح در هر ثانیه چند یون Fe^{2+} تشکیل می‌شود؟ ب) اگر فقط ۱۰٪ سطح، آن‌ها محسوب شود، عمق خوردگی در هر ماه چقدر است؟

حل:

$$\text{الف) } (2 \text{ amp/m}^2) / (2 \text{ el./Fe}^{2+}) (0.16 \times 10^{-18} \text{ amp.sec/el.})$$

$$= 6 \times 10^{18} \text{ Fe}^{2+} / \text{sec.m}^2$$

* برای اجتناب از هرگونه اشتباهی به سه مورد زیر توجه کنید: (۱) اکسیژن خوردگی را تسریع می‌کند. (۲) در یک پیل اکسایشی، خوردگی در محلی که اکسیژن نیست تسریع می‌شود زیرا اکسیژن بر طرف کاتدی پیل اثر می‌کند و الکترونها را از آن‌ها بیرون کشیده در آنجا موجب خوردگی می‌شود. (۳) سرانجام، برخی از فلزات (مانند آلومینیم و فولاد زنگ‌نزن) چون می‌توانند با اکسیژن ترکیب شوند و لایه محافظ سطحی تشکیل دهند اثر ناپذیر می‌شوند. فلزی که از نظر الکتریکی عایق شده باشد خورده نمی‌شود.

$$= 6 \times 10^{14} \text{Fe}^{2+} / \text{sec mm}^2.$$

$$\text{ب) } (6 \times 10^{14} \text{Fe/sec} \cdot \text{m}^2) / (0.10) = \text{سرعت خوردگی موضعی}$$

$$= 6 \times 10^{14} \text{Fe/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ موضعی}$$

$$\frac{(6 \times 10^{14} \text{Fe/sec} \cdot \text{m}^2)(2.6 \times 10^6 \text{sec/mo})(10^{-3} \text{mm/m})}{(0.6 \times 10^{24} \text{Fe/55.85 g})(7.86 \times 10^6 \text{g/m}^3)}$$

$$= \sim 2 \text{ mm/mo.}$$

توضیح. هر عاملی که خوردگی را موضعی کند. [شکل ۱۲-۳-۹ (د) را ببینید] روی عمر قطعه شدیداً اثر می‌گذارد، زیرا با آنکه بیشتر فاز سالم است ولی ممکن است شکست صورت گیرد. برای مثال نقاط زنگ‌زده روی سپر ماشین را بررسی کنید. ▲

مثال ۱۲-۴-۲ لایه Al_2O_3 که روی آلومینیم تشکیل می‌شود، فلز را اثرناپذیر می‌سازد. ضخامت این لایه چقدر باشد که چگالی جریان خوردگی در پیل که ۲ ولت تولید می‌کند، برابر 10^{-4} amp/m^2 شود؟

$$\text{حل: مبنای: } 10^{-4} \text{m}^2 = 1 \text{cm}^2 \text{؛ بنابراین } 10^{-8} \text{amp از آنجا که } E = IR$$

$$R = \frac{2 \text{ V}}{10^{-8} \text{ amp}} = 2 \times 10^8 \Omega$$

$$\text{از } \rho = RA/L \text{ و پیوست (ج)}$$

$$L = \frac{(2 \times 10^8 \Omega)(10^{-4} \text{m}^2)}{> 10^{12} \Omega \cdot \text{m}}$$

$$= < 2 \times 10^{-8} \text{m, یا } 20 \text{ nm.}$$

توضیح. ضخامت لایه اکسید از طول موج نور کمتر است ($\sim 500 \text{ nm}$). در نتیجه آن را نخواهیم دید. حتی با وجود این چگالی جریان و سرعت خوردگی را تا اندازه‌ای که قابل اغماض است پایین می‌آورد، البته آلومینیم اگر در محیط‌هایی مثل محلول قلیایی قرار گیرد که در آن لایه Al_2O_3 حل می‌شود، اثرناپذیری از بین می‌رود. ▲

۱۲-۵ کنترل خوردگی

جلوگیری کامل از خوردگی فقط در صورت نبودن الکترولیت میسر است. تساه این هم مشکل است. همان‌طور که می‌دانید ابزاری که در کارگاه آویزان اند لایه رطوبتی جذب می‌کنند و زنگ می‌زنند، سازندگان ابزار از این امر آگاهند، در نتیجه این گونه ابزار را قبل

از حمل برای خرده فروش یا مشتری با لایه ای از گریس یا روغن می پوشانند. از آنجا که خوردگی واکنشی گالوانی است، برای ادامه آن باید دو نوع فلز موجود باشد، مهندس طراح با آگاهی از این موضوع سعی می کند از به کار بردن «پیچ برنجی-واشر فولادی» خودداری کند. شاید بسیاری از متخصصین فنی ندانند که در یک ماده واحد به موجب میکروساختار تمرکز تنش، یا ناهمگنی الکتروولیت، آند و کاتد به وجود می آید (بخش ۱۲-۳). چنین نکاتی باید هنگام کنترل خوردگی در نظر گرفته شوند. در این بخش علاوه بر (۱) ایجاد سطوح محافظ و (۲) اجتناب از جفت های گالوانی، روش دیگری برای کمیت کردن خسوردگی یعنی (۳) محافظت گالوانی مورد بحث قرار می گیرد. این سه روش موضوع این بخش اند.

سطوح محافظ. قدیمی ترین روش متداول برای کنترل خوردگی، محافظت سطح فلز است. مثلاً پوششی از رنگ، فلز زیرین را از الکترولیت خورنده جدایی کند، مهم ترین محدودیتی که این روش دارد، رفتار لایه محافظ در حین کار است. لایه گریسی که قبلاً ذکر شد مسلماً دوام زیادی ندارد. دمای بالا و سایش مواد سایا محدودیتهایی در مورد پوششهای آلی به وجود می آورند.

ولی روکشهای محافظ الزاماً از مواد آلی نیستند. مثلاً قلع می تواند به عنوان روکش «بی اثر» برای فولاد به کار رود. آبکاری بانیکل، مس، نقره و غیره مثالهایی از ایجاد سطوح مقاوم در برابر خوردگی اند. بعضی از فلزات را می توان به عنوان پوششهای فروزاندایی داغ به کار برد، مثل فرو بردن سیم یا ورق فولادی در روی مذاب این فرایند دوپیننگ نامیده می شود. مواد سرامیکی بی اثر نیز ممکن است برای روکش محافظ به کار آیند. مثلاً لعابهای واقعی روکش اکسیدی اند که به صورت پودر شیشه به کار می روند و پس از ذوب شدن به صورت لایه سطحی شیشه ای درمی آیند. مزایا و مضرات چند دسته از روکشهای محافظ در جدول ۱۲-۵ ذکر شده است.

اثر ناپذیر شدن، که در بخش قبل مورد بحث قرار گرفت، نیز روکش یا لایه نازک محافظی ایجاد می کند همانطور که از جدول ۱۲-۵-۲ پیداست. اهمیت آن بخصوص برای آلومینیم و یاتاقانهایی است که از فولاد زنگ زن کرم دار ساخته می شوند. تفاوت این مجموعه گالوانی با جدول ۱۲-۲-۱ در آن است که در اینجا آلیاژهای معمولی که غالباً تحت شرایط خوردگی مصرف می شوند، ذکر شده است و در میان آنها بعضی از فلزات قبلی نیز آمده است. یادآوری می شود که تعدادی از آلیاژها دوبار نوشته شده اند، یکی در حالت فعال و باریک در شرایط اثر ناپذیر. زیرا وجود لایه اکسیدی روی سطح، آلیاژها را به طرف انتهای کاتدی این مجموعه سوق می دهد. در حقیقت، وقتی این فولادها اثر ناپذیر شوند کمتر از مس، مفرغ و برنج قابل خورده شدن اند. در این مورد یک نکته حائز اهمیت است، چگالی جریان خوردگی فلز غیر فعال شده ای در شکل ۱۲-۴-۴ به صورت نقطه (P) نشان داده شده است، هرگاه شرایط کار طوری تغییر کنند که لایه اکسیدی محافظ آن خراب

جدول ۱۲-۵-۱ مقایسه پوششهای محافظ بی اثر

نوع	مثال	مزایا	مضرات
آلی	رنگهای «لغابی» پخته شده	انعطاف پذیر کاربرد آسان	اکسید شونده، نسبتاً نرم محدود پیتهای دمایی
فلزی	آبکاری با فلزات نجیب	تغییر شکل پذیر نامحلول در محلولهای آلی	ایجاد پیل گالوانی در صورت پارگی رسانای گرما
سرامیکی	روکش اکسیدی لغابی شیشه ای	مقاوم در دمای بالا سخت تر	شکننده، عایق گرما عدم ایجاد پیل با فلز اصلی

شود، چگالی جریان خوردگی دهها بار بیشتر شده و به نقطه (A) می رسد. واضح است که در این مورد هم مهندس طراح و هم مدیر فنی باید دقت کافی مبذول دارند. بازدارنده ها ترکیباتی اند که به الکترولیت اضافه می شوند تا از خوردگی مخازن فلزی جلوگیری کنند. آشنا ترین آنها ضد زنگی است که در رادیاتور اتومبیل ریخته می شود تا خوردگی را کاهش دهد. همچنین ممکن است در دیگ بخار و یا سایر سیستمهای آب داغ به کار روند. بازدارنده شامل آنیونهای چنداتی است که در سطح فلز جذب می شوند و لایه ای محافظ و غنی از اکسیژن تشکیل می دهد، که به آنچه در اثر ناپذیر شدن به دست می آید، شبیه است. معمولاً بازدارنده ها شامل ترکیبات کرمات، فسفات، تنگستات، یا یونهای دیگر عناصر واسطه ای اند که قابلیت اکسید کنندگی آنها بالاست.

اجتناب از جفتهای گالوانی. ساده ترین روش اجتناب از جفت گالوانی محدود کردن طراحی به تنها یک فلز است، و لسی این کار همیشه عملی نیست. در برخی شرایط می توان فلزاتی که ترکیب متفاوت دارند را از نظر الکتریکی عایق و از ایجاد پیل جلوگیری کرد. سایر روشهای ساده تر ضمانت کمتری دارند، فولاد زنگ نزن مثال ویژه ای ارائه می دهد. در انواع مختلف فولاد زنگ نزن مقدار کرم از ۱۳ تا ۲۷٪ تغییر می کند. هدف از وجود کرم به وجود آوردن ترکیبی است که به طور عادی سطح اثر ناپذیری تشکیل دهد.

جدول ۱۲-۵-۲ مجموعه گالوانی آلیاژهای متداول.

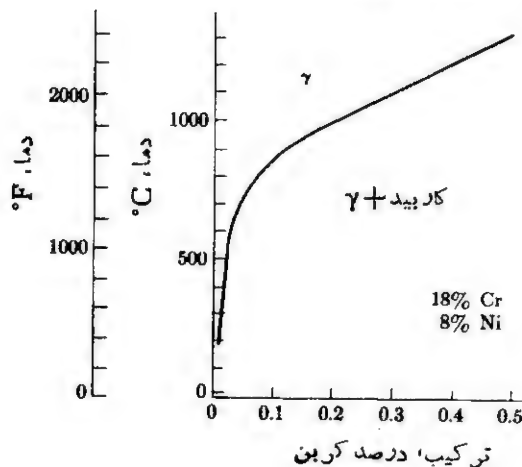
گرافیت	کاتدی	انیکل - A
نقره		قلع
P - فولاد $12\%Ni, 18\%Cr, 3\%Mo$		سرب
P - فولاد $20\%Ni, 25\%Cr$		لحیم سرب-قلع
P - فولاد 30% تا $23\%Cr$		A - فولاد $12\%Ni, 18\%Cr, 3\%MO$
P - فولاد $14\%Ni, 23\%Cr$		A - فولاد $20\%Ni, 25\%Cr$
P - فولاد $8\%Ni, 18\%Cr$		A - فولاد $12\%Ni, 23\%Cr$
P - فولاد $7\%Ni, 17\%Cr$		A - فولاد $8\%Ni, 18\%Cr$
P - فولاد 18% تا $16\%Cr$		A - فولاد $7\%Ni, 17\%Cr$
P - فولاد 14% تا $12\%Cr$		Ni-resist
P - $80\%Ni, 20\%Cr$		A - فولاد 30% تا $23\%Cr$
P - اینکونل		A - فولاد 18% تا $16\%Cr$
P - $60\%Ni, 15\%Cr$		A - فولاد 14% تا $12\%Cr$
P - نیکل		A - فولاد 4% تا $6\%Cr$
فلز مونل		چدن
نیکل-مس		فولاد می
نقره-نیکل		فولاد کربنی
مفرغها		T-2017 آلایز آلومینیم
مس		کادمیم
برنجها		1100, آلومینیم
A - $80\%Ni, 20\%Cr$		روی
A - اینکونل		آلیاژهای منیزیم
A - $60\%Ni, 15\%Cr$	منیزیم آنودی	

A فعال بودن و P اثر ناپذیر بودن را نشان می‌دهد.

بعضی از فولادهای زنگ‌نزن (نهمه آنها)، ۸ تا ۱۰٪ نیکل دارند که نجیبتر از آهن است. (جدول ۱۲-۲-۱).

□ فولاد زنگ‌نزن «۱۸-۸» (یعنی ۱۸٪ Cr و ۸٪ Ni) مقدار زیادی عناصر آلیاژی دارد که موجب تشکیل استنیت می‌شود، استنیت در دمای متعارفی پایدار است. چنین فولادی در کاربردهایی که به‌سختی زیاد نیاز دارند به‌کار نمی‌رود، بلکه در شرایط خورنده به‌کار می‌رود. به این جهت کربن که در دماهای بالا حلالیت بیشتری در استنیت دارد (شکل ۱۲-۵-۱) کمترین مقدار انتخاب می‌شود. اگر فولادی با ۰.۱٪ کربن از 1000°C (1800°F) به‌طور سریع سرد شود، کربید جداگانه تشکیل نمی‌شود و پیل گالوانی به‌وجود نمی‌آید، از طرف دیگر اگر همین فولاد به‌آهستگی سرد شود، در حوالی $650^{\circ}\text{C} \pm$ (1200°F) برای مدت کوتاهی نگهداشته شود، کربن به‌صورت کرم کربید رسوب می‌کند و این رسوب معمولاً در مرز دانه‌ها تشکیل می‌شود (شکل ۱۲-۵-۲). در این صورت دو حالت وجود دارد: (۱) ممکن است پیل گالوانی در مقیاس میکروسکوپی به‌وجود آید، یا (۲) کربن، کربید کرم تشکیل دهد (که پایدارتر از Fe_3C است) و مرز دانه‌ها را از کرم‌تهی کند تا اثر ناپذیر بودن به‌طور موضعی از بین برود (شکل ۱۲-۵-۳). در هر دو حالت خوردگی در مرز دانه‌ها تشدید می‌شود که باید از آن جلوگیری کرد (شکل ۱۲-۵-۴).

□ برای جلوگیری از خوردگی بین دانه‌ای چند روش وجود دارد که با توجه به شرایط کاربرد، یکی از آنها انتخاب می‌شود.

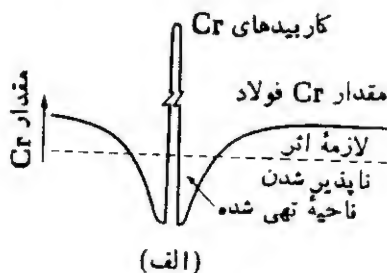
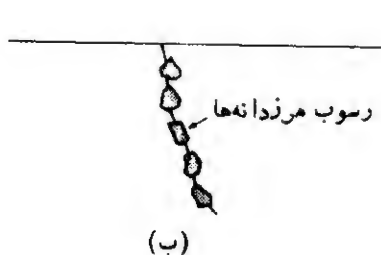


شکل ۱۲-۵-۱ حلالیت کربن در فولاد زنگ‌نزن استنیتی. با کاهش دما حلالیت کربن در فولاد زنگ‌نزن نوع «۱۸-۸» به‌مقدار زیادی کم می‌شود. بنابراین اگر سرد کردن سریع نباشد، کربن رسوب می‌کند. کربید رسوب کرده غنی از کرم است.



شکل ۱۲-۵-۲ رسوب کربید در مرز دانه‌ها،
 ۱۵۰۰×. اتمهای کوچک کربن به راحتی
 در مرز دانه‌ها نفوذ می‌کنند و اگر زمان کافی
 باشد (چند ثانیه در 650°C) به صورت
 کربید کرم رسوب می‌کنند. پس پیل گالوانی
 تشکیل می‌شود.

۱. آب دادن برای جلوگیری از رسوب کربن. این روش معمولاً به کار می‌رود مگر
 الف) دمای لازم در هنگام استفاده از فولاد در گستره رسوب باشد، یا ب) در شکل دادن،
 جوشکاری و در مواردی که ابعاد قطعه مانع آب دادن می‌شود.
۲. تابکاری بسیار طولانی در گستره جدایش کربید. مزایای این روش عبارت‌اند از
 الف) تابش‌نگی ذرات کربید و ب) همگن شدن مقدار کرم به طوری که در مرز دانه کمبود
 کرم به وجود نیاید. ولی این روش متداول نیست زیرا به این ترتیب مقاومت در برابر
 خوردگی چندان زیاد نمی‌شود.
۳. انتخاب فولادی که کمتر از ۰.۰۳٪ کربن داشته باشد. همان‌طور که شکل ۱۲-۵-۱
 نشان می‌دهد در این صورت از رسوب کردن کربید جلوگیری می‌شود. ولی این فولاد گرانی
 است زیرا خارج کردن کربن از فولاد و به دست آوردن چنین ترکیبی مشکل است.
۴. انتخاب فولادی که مقدار زیادی کرم دارد. فولادی که ۱۸٪ کرم دارد مشکل‌تر
 از فولاد ساده خورده می‌شود. افزایش کرم (نیکل) حفاظت بیشتری در برابر خوردگی
 به وجود می‌آورد. این کار نیز به علت بالا بودن قیمت عناصر آلیاژی گران تمام می‌شود.
۵. انتخاب فولادی که شامل عناصر تشکیل دهنده قوی کربید است. این عناصر شامل



شکل ۱۲-۵-۳ تهی شدن از کرم در نواحی مجاور مرز دانه. رسوب کردن کربید تقریباً
 ده برابر کربن، کرم مصرف می‌کند. چون اتمهای کرم بزرگ‌ترند و به کندی نفوذ می‌کنند.
 مقدار کرم در نواحی مجاور مرز دانه‌ها از مقدار لازم برای محافظت کم‌تر است.



شکل ۱۲-۵-۴ خوردگی بین دانه‌ای. اگر فولاد تا کستره رسوب کاربید گرم شود، این نوع خوردگی بسیار شدید می‌شود.

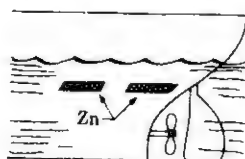
تیتانیم، کلمبیم، و تانتالم اند. در چنین فولادهایی به هنگام سرد شدن، کربن در مرزدانه‌ها رسوب نمی‌کند زیرا قبلاً در دماهای بسیار بالاتر به صورت کاربید تیتانیم، کاربید کلمبیم یا کاربید تانتالم رسوب کرده است. این کاربیدها بی‌ضررند زیرا نه فولاد را از کرم تهی می‌کنند و نه واکنش گالوانی را در مرزدانه‌ها به وجود می‌آورند. چنین روشی بخصوص در قطعات تولیدی از فولاد زنگ‌نزن که باید به وسیله جوشکاری ساخته شوند بسیار متداول است.

مثالهای بالا با آنکه خصوصاً در مورد فولاد گفته شده‌اند ولی روشهایی را نشان می‌دهند که برای کاهش خوردگی در فلزات مختلف می‌توان به کار برد. انتخاب دقیق طرز کار به نوع آلیاژ و شرایط استفاده از آن بستگی دارد.

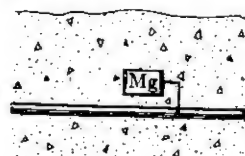
محافظت گالوانی. با استفاده بجا از مکانیسم خوردگی می‌توان آن را تا اندازه‌ای محدود کرد. نمونه‌ای از آن آهن روپینه کاری شده است که در بخش (۱۲-۳) در مورد آن بحث شد. پوشش روی به عنوان آند قربانی عمل می‌کند و به جای فولاد زیر آن خورده می‌شود. همین روش را در موارد دیگر می‌توان به کار برد. سه مثال آن در شکل ۱۲-۵-۵ دیده می‌شود. مزیت چنین روشی آن است که آند از بین رفته به آسانی قابل تعویض است. مثلاً



مخزن آب
(ج)

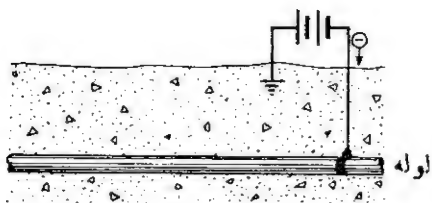


کشتی
(ب)



لوله زیر زمینی
(الف)

شکل ۱۲-۵-۵ آندهای قربانی. الف) ورقه‌های منیزیم در طول لوله کشی زیر خاک؛ ب) ورقه‌ای از روی در سطح بدنه کشتی؛ ج) میله منیزیمی در مخزن آب گرم صنعتی. هر یک از این آندهای قربانی به آسانی قابل تعویض اند و موجب کاند شدن جسم می‌شوند.



شکل ۱۲-۵-۶ ولتاژ مؤثر ولتاژ کم جریان مستقیم به اندازه کافی الکترون تولید خواهد کرد که قطعه را کاتد کند.

در شکل ۱۲-۵-۵ (الف) ورقهای منیزیم را می توان با صرف هزینه ای بسیار کمتر از هزینه عوض کردن لوله های زیر زمینی تعویض کرد.

روش دوم محافظت گالوانی استفاده از ولتاژ مؤثر روی فلز است که در شکل ۱۲-۵-۶ دیده می شود. هر دو روش یعنی آند قربانی و ولتاژ مؤثر اصل محافظتی یکسانی دارند، به این ترتیب که الکترون اضافه تولید می کنند به طوری که فلز کاتد شده، واکنشهای خوردگی متوقف می شوند.

مرور و بررسی مطالب

خلاصه

ابتدا ملاحظه کردیم که خوردگی عکس آبکاری برقی است و بر همین اساس مقدار خوردگی را به شدت جریان ربط دادیم برای انجام خوردگی یا آبکاری برقی دو الکتروود و یک الکتروولیت لازم است.

بیشتر خوردگی از پیل های گالوانی و جریان الکتریکی حاصل از آن ناشی می شود. دو الکتروود متفاوت لازم است که به یکی از صورتهای زیر تولید شود: (۱) اختلاف در ترکیب، (۲) اختلاف در تراز انرژی (نامنظم، یا نواحی تنش دار)، یا (۳) اختلاف در محیط الکتروولیتی. این مطالب در جدول ۱۲-۵-۳ به طور مفصلتر آمده اند. الکتروودی که خورده می شود آند است و کاتد محافظت می شود.

اکسیژن خوردگی فلزات را تسریع می کند. ولی خوردگی در محلی شدت می یابد که اکسیژن کم باشد، زیرا اکسیژن در طرف کاتدی پیل گالوانی وارد واکنش می شود. در آلومینیم، تیتانیم، و فولادهای گرم دار، اکسیژن لایه محافظی ایجاد می کند. این پدیده را اثر ناپذیر سازی می نامند و مبنای بی اثر شدن نسبی فولادهای زنگ نزن است.

اگر در حوالی سطح الکتروود، الکتروولیت از واکنشگرها تهی شود، روی کاتد قطبش اتفاق می افتد و در نتیجه چگالی جریان کم می شود. از طرفی چون واکنشگرها (اکسیژن و یونها) در دماهای بالاتر یا با هم زدن سریعاً افزایش می یابند، قطبش با تغییر شرایط کار تا حد زیادی تغییر می کند.

ساده ترین راه کنترل خوردگی جدا کردن سطح فلز از محیط به وسیله روکشهای محافظ یعنی مواد آلی (رنگ)، سرامیکی (لعاب)، یا فلزات دیگر است. با وجود این کنترل

جدول ۱۲-۵-۳ خلاصه‌ای از پیل‌های گالوانی.

مثالهای ویژه	آند	کاتد
	فلز اصلی	فلز نجیب
Zn در مقابل Fe	Zn	Fe
Fe در مقابل H_2	Fe	H_2
H_2 در مقابل Cu	H_2	Cu
	انرژی بیشتر	انرژی کمتر
مرزها	مرزدانه	دانه
تنشها	سردکاری شده	تابکاری شده
خوردگی تنش	نواحی تنش دار	نواحی بدون تنش
	غلظت کمتر	غلظت بیشتر
الکترولیت	محلول رقیق	محلول غلیظ
اکسایش	O_2 کم	O_2 زیاد
محل کثیف	نواحی پوشیده شده	نواحی تمیز

خوردگی هنگامی رضایت بخش است که از ایجاد جفت‌های گالوانی اجتناب شود. در محیط بسیار خورنده، فلزات مختلف باید از نظر الکتریکی جدا باشند. در مورد فولاد زنگ‌نزن باید دقت بیشتری کرد که پیل گالوانی در میکروساختار (مثلاً کاربید در نواحی خالی از کربن) به وجود نیاید. در برخی موارد نیز محافظت از خوردگی با استفاده از آند قربانی یا ولتاژ مؤثر عملی می‌شود. در هر دو صورت فلز محافظت شونده کاتد خواهد بود.

سؤالات تشریحی

۱. فرق بین آند و کاتد را بر مبنای حرکت الکترونی شرح دهید. طبق تعریفات بخش ۱۲-۱،
لوله اشعه کاتدی چگونه توضیح داده می‌شود؟
۲. چرا ۹۶۵۰۰ کولن برابر یک فاراده، $\frac{1}{2}$ است.

۳. منبع الکترولیتها در پیل خشک معمولی چیست؟ (الکترولیت خمیری ژلاتینی حاوی NH_4Cl است. واکنش کاتدی، Mn^{4+} در MnO_2 را به Mn^{2+} تبدیل می‌کند.)
۴. چرا از الکترود هیدروژن به عنوان الکترود مرجع استفاده می‌شود و عنصر دیگری مثل سرب به کار نمی‌رود؟
۵. قوطی کنسرو پوشیده شده از قلعی در دریاچه‌ای انداخته شده است. رابطه (۲-۳-۲) به عنوان واکنش آنودی به وجود می‌آید. واکنش کاتدی واکنش $\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$ نیست. چرا؟ واکنش احتمالی کاتدی چیست؟
۶. تحت چه شرایطی زنگ زدگی به وجود نخواهد آمد؟ چرا؟
۷. پیشنهاد شده است که با به کار بردن محلول آبی NaOH ($\text{pH} = ۱۴$) و الکترولیز کردن آن سدیم به دست آوریم. در این باره شرح دهید.
۸. تفاوت بین نوع حفاظتی که توسط روی و قلع از آهن به عمل می‌آید را مشخص کنید.
۹. در کدهای اولیه کشتی به عایق‌هایی اشاره می‌شود مثل تفلون که در سیستم لوله‌کشی بین لوله‌های مسی و فولادی قرار می‌گیرد. در این باره شرح دهید.
۱۰. در کدهای الکتریکی به «فرع‌این» اشاره می‌شود که اطراف این جفت عایق شده قرار می‌گیرد تا آن را به زمین مربوط کند. آیا این ضد کد لوله‌کشی است؟ شرح دهید.
۱۱. میخی با پوششی از روی، از نیمه برش داده شده و در الکترولیتی قرار داده می‌شود. الف) برای قضاوت در مورد محل‌آند چه جفت‌هایی باید در نظر گرفته شوند؟ ب) محلی را که ابتدا خورده خواهد شد ذکر کنید.
۱۲. شرح دهید که چرا فلز در الکترولیت رقیق نسبت به فلزی که در الکترولیت غلیظ قرار دارد آند می‌شود.
۱۳. شرح دهید که چرا فلز در الکترولیت کم اکسیژن نسبت به فلزی که در الکترولیت غنی از اکسیژن قرار دارد، آند می‌شود.
۱۴. اگر اکسیژن خوردگی را تشدید می‌کند (روابط $۱۲-۲-۸$ و $۱۲-۲-۹$)، چرا در نواحی کم اکسیژن خوردگی صورت می‌گیرد؟
۱۵. چگونه صدفها خوردگی تنه‌کشتی را تشدید می‌کنند؟
۱۶. چرا وقتی از آلومینیم به جای آهن در ظروف آشپزخانه استفاده می‌شود خوردگی کمتر است؟
۱۷. چرا وقتی که آند کوچکتر از کاتد است خوردگی تشدید می‌شود ولی اگر عکس آن باشد اینطور نیست؟
۱۸. «سوراخهای ریز» در ورق‌هایی که با قلع پوشش داده شده‌اند، برای سازندگان قوطی‌های کنسرو دردسر ایجاد می‌کنند. در این باره توضیح دهید.
۱۹. نورفلاش با باتری خشک قدیمی در حین کار کم نور می‌شود. اگر مدت کوتاهی از آن استفاده نشود، دوباره با نور بیشتری روشن خواهد شد. در این باره توضیح دهید.
۲۰. توده‌های فولاد در سطوح برآمده بالا بسیار بیشتر از سطوح پایینتر خورده می‌شوند. چرا؟

□ ۲۱. لعاب شیشه‌ای (شیشه) برای پوشش دادن گرم کننده آب منازل به کار می‌رود. انبساط گرمایی شیشه و فلز در مقایسه با یکدیگر باید چگونه باشد؟ (فصل ۸ را ببینید.)

۲۲. مکانیک کارخانه‌ای استفاده از پیچ تخلیه منیزیمی را برای پوسته میل لنگ اتومبیل به عنوان وسیله‌ای برای مبارزه با خوردگی موتور پیشنهاد می‌کند. در این باره توضیح دهید.

۲۳. پوششهای آستری از انواع مختلف برای اتومبیل‌های جدید به کار می‌روند. تحت چه شرایطی این پوششها مؤثرند؟ تحت چه شرایطی مضرند؟

۲۴. آیا امکان دارد که برای محافظت از تنه کشتی از ولتاژ مؤثر استفاده کرد؟ توضیح دهید.

۲۵. سه نمونه از خوردگیهای را که با آن برخورد کرده اید ذکر کنید. ماهیت زوال آنها را شرح دهید و علل خوردگی را بیان کنید.

□ ۲۶. ورق از فولاد زنگ‌نزن به مجرای دایره‌ای شکلی جوش داده شده است. پس از مدتی در طول نواری به موازات هر طرف از جوش، به فاصله‌ای حدود یک سانتی‌متر زنگ زدگی پدید می‌آید. چرا این پدیده صورت می‌گیرد؟ آیا می‌توانیم از این امر جلوگیری کنیم؟

مسائل

۱-۱-۱۲ برای پوشش دادن هر گرم نیکل از الکترولیت Ni^{2+} ، چند کولن لازم است؟

جواب: ۳۳۰۰ coul

۱-۱-۱۲ اگر بخواهیم در مدت ۹۰ دقیقه پوششی از نیکل به ضخامت ۰۱ میلی‌متر، روی قطعه‌ای از مس (1230 mm^2) رسوب دهیم چه شدت جریانی لازم است؟

۱-۱-۱۲ بازتابنده‌ای فلزی به مساحت 127 m^2 آبکاری می‌شود. شدت جریان ۱۰۰ آمپر است. الف) در حین آبکاری، در هر ساعت چند گرم Cr^{2+} باید به الکترولیت اضافه شود؟ ب) ضخامت پوشش تشکیل شده در هر ساعت چقدر است؟

جواب: الف) 97 g (ب) 1.0 mm (یا $10 \mu\text{m}$)

۱-۱-۱۲ چه مدت طول می‌کشد تا از الکترولیت Cr^{2+} و شدت جریان ۱ آمپر، یک گرم کرم رسوب داده شود؟

۱-۱-۱۲ در هر ثانیه یک حباب هیدروژن از کاتد متصاعد می‌شود. هر کدام وقتی از سطح الکترولیت خارج می‌شوند 1 mm^3 حجم دارند جریان الکتریکی موجود چقدر است؟ (۱ مول گاز در شرایط $\text{STP} = 22.4 \text{ m}^3$)

جواب: 806 mA

۱۲-۱-۶ برای خالص کردن آلومینیم ابتدا Al_2O_3 را در نمک مذابی ذوب می‌کنیم و سپس فلز را روی کاتد رسوب می‌دهیم. برای ایجاد ۱۰ گرم رسوب در روز، روی هر mm^2 از سطح الکتروود، چگالی جریان چند amp/mm^2 است؟

جواب: $0.124 amp/mm^2$

۱۲-۲-۱۱ الکترودهای پیل گالوانی استاندارد نیکل و منیزیم اند. چه اختلاف پتانسیلی ایجاد خواهد شد؟

جواب: ۲.۱ ولت (در صورتی که کاتد از نیکل باشد.)

۱۲-۲-۲ برای تعیین پتانسیل الکتروود کادمیم، شکل ۱۲-۲-۱ به جای روی و مس برای کادمیم و نقره تکرار شده است. ولت سنج ۲۰- ولت را نشان می‌دهد. پتانسیل الکتروود کادمیم در مقایسه با هیدروژن چقدر است؟

۱۲-۲-۳ برای داشتن پتانسیل الکتروود ۳۲ V (در مقایسه با هیدروژن) غلظت مس در الکترولیت چقدر (g/l) باید باشد؟

جواب: ۱۳۴ g بر لیتر

۱۲-۲-۴ توضیح دهید که آب چگونه الکترولیز شده و H_2 و O_2 تولید می‌کند.

۱۲-۲-۵ در شکل ۱۲-۲-۱، به جای مس طلا و به جای روی قلع قرار گرفته است. بر اساس واکنشهای نیم پیل جدول ۱۲-۲-۱، وزن قلع خورده شده در هر ساعت بیشتر است یا وزن طلایی که رسوب داده می‌شود؟

جواب: طلا $10 w/o$ بیشتر است.

۱۲-۳-۱ پیل شکل ۱۲-۲-۱ الکترولیتهایی حاوی ۳ g روی و ۲۳ g مس در هر لیتر دارد. ولتاژ پیل چقدر است؟

جواب: $1.13 V$

۱۲-۳-۲ سیمی آهنی در فاضلابی معدنی قرار می‌گیرد که غلظت یون Fe^{2+} در آن از $M 0.09$ در یک سر (A) تا $M 0.055$ در سر دیگر (B) تغییر می‌کند. الف) کدام سر آن آند است؟ ب) اختلاف پتانسیل بین دوسر آن چقدر است؟

۱۲-۳-۳ دو قطعه فلز، یکی مس و دیگری در آب دریا قرار می‌گیرند و توسط سیم مسی به هم مربوط می‌شوند. بانوشتن واکنشهای نیم پیل الف) برای آند؛ و ب) برای کاتد و همچنین با مشخص کردن ج) جهت جریان الکترون در سیم و د) جهت «جریان برق» در الکترولیت، پیل گالوانی را مشخص کنید؛ ه) برای آنکه روی قطبیت را تغییر دهد به جای مس از چه فلزی می‌توان استفاده کرد؟

۱۲-۳-۴ روابط (۱-۱-۱۲)، (۴-۲-۱۲)، (۷-۲-۱۲)، (۸-۲-۱۲)، (۹-۲-۱۲) و خوردگی آهن را در نظر بگیرید. اگر واکنش کاتدی صورت گیرد کدامیک از این روابط واکنش کاتدی مربوط به آن است، در صورتی که: الف) آهن در ساحل دریا در آب قرار داشته باشد؟ ب) آهن در محلول سولفات مس قرار داشته باشد؟ ج) آهن به صورت قوطی کنسروی حاوی نوشیدنی کربنات شده باشد؟ د) آهن به صورت تیغه میل زنگ زده ای باشد؟ ه) آهن به صورت سپر خراش خورده اتومبیلی باشد؟

۱۲-۳-۵ از میان هریک از جفتهای زیر آند را انتخاب کنید. (بجز عواملی که ذکر شده، سایر عوامل برای دو عضو هر جفت یکسان است.) الف) مس در مقابل نقره ب) مس در مقابل آهن ج) روی (در محلول $M-10$) در مقابل روی (در محلول $M-20$) د) دانه های نیکل در مقابل مرز دانه های نیکل ه) محصول روکش شده یا نیکل در مقابل الکتروکد نیکل □ و) فلز اثر ناپذیر شده در مقابل فلز فعال شده ز) آلومینیم تحت تنش قرار گرفته در مقابل آلومینیم بدون تنش.

□ ۱۲-۴-۱ خوردگی از نوع حفره ای شدن موضعی بدنه قایقی آلومینیمی را پس از ۱۲ ماه ماندن در آب دریا سوراخ کرده است. ضخامت ورق آلومینیم ۱٫۱ میلی متر است. قطر متوسط سوراخ ۲٫۰ میلی متر است. الف) در هر ثانیه چند اتم از حفره جدا شده است؟ ب) چگالی جریان خوردگی چقدر بوده است؟

جواب: الف) $10^{10}/\text{sec} \times 6 \times 10^6$ ب) A/m^2

□ ۱۲-۴-۲ اگر چگالی جریان A/m^2 ۱٫۰ باشد، چه مدت طول می کشد تا به طور متوسط ۱ mm از سطح آلومینیم خورده شود؟

□ ۱۲-۴-۳ چگالی متوسط جریان $10^2 \text{ amp}/m^2$ برای ایجاد پوشش آندی شده روی آلومینیم به کار می رود. پوشش Al_2Cl_3 ۱ μm ضخامت دارد. مدت زمان لازم چقدر است؟

جواب: ۲۱۵ sec

چدن، بتن، چوب و مواد چندسازه

(مواد پرمصرف و پیچیده‌تر)

عنوان این فصل را چهار نمونه از مواد پرمصرف در مهندسی و طراحی فنی تشکیل می‌دهد. چدن قدمت تاریخی دارد و ارزانترین ماده فلزی است. ضمناً کاربردهای بسیاری نیز دارد، از جمله آنکه ۸۰ درصد از اجزای موتور اتومبیل از این ماده ساخته شده است. وزن بتن تولید شده در هر سال از هر ماده مهندسی دیگر بیشتر است (البته اگر کاربرد فنی هوا، سوخت و آب را در نظر نگیریم). چوب، در این روزهای کمبود مواد، قادر است جانشین مواد دیگر شود و این مزیت را دارد که به آسانی و با کمترین انرژی قابل تغییر شکل است. مواد چندسازه نمونه مشهودی از مواد «سفارشی» یا «مهندسی» اند که در بعضی موارد «مواد فردا» نامیده می‌شوند.

هیچیک از مواد بالا ساده نیستند ولی هر یک نمونه‌ای اند از اینکه چگونه خواص به ساختار مربوط می‌شود. این فصل آخر می‌تواند به جمع‌بندی مفهوم ارتباط بین ساختار و خواص کمک کند و دانشجویانی را که بعدها در مورد آنها درسهای تخصصی‌تری نخواهند گرفت با تکنولوژی این مواد آشنا سازد.

محتوای فصل ۱۳ به مرادی که در سرفصل آمده محدود می‌شود، ولی انواع دیگر مواد مانند خاك، فولادهای ابزار، آجر، كاغذ، و سفالینه‌ها را نیز می‌تواند شامل شود. هریك از این مواد نسبتاً پیچیده‌اند ولی می‌توانند بر اساس ساختار داخلی تحلیل شوند.

هدف از مطالعه

يك یا چند ماده از مواد بالا را انتخاب کنید. اگر بین مواد انتخابی شما چدن وجود دارد:

۱. تشخیص بین انواع مختلف چدن بر مبنای میکروساختار.
۲. توانایی در تشریح جزئیات چگونگی تولید انواع فریتی و پرلیتی، چدن خاکستری، کروی، و چکش‌خوار با كمك نمودار فازي Fe-C.
۳. ربط دادن خواص مهم به ماهیت میکروساختار آن.
اگر بین مواد انتخابی شما بتن وجود دارد،
۴. تشخیص جنبه‌هایی که مشخص‌کننده فشردگی ذرات و خرده‌سنگهاست.
۵. شناخت ماهیت، کلی فرایند سخت کردن سیمان پرتلند.
۶. توانایی محاسبه نسبت مخلوطهای بتن.
۷. تشریح عواملی که موجب شکست بتن می‌شوند.
اگر بین مواد انتخابی شما چوب وجود دارد،
۸. آشناسدن با واحدهای بیولوژیکی که در ساختار چوب یافت می‌شود.
۹. ربط دادن چندسویی ساختار چوب به خواص جهتدار آن.
۱۰. تشریح روشهایی که در آنها چوب برای بهبود خواص و یا کار مرغوبتر می‌شود.
اگر در میان مواد انتخابی شما مواد چندسازه وجود دارد،

۱۱. آشناسدن با انواع مواد چندسازه به غیر از بتن مسلح و پلاستیکهای تقویت شده با رشته‌های شیشه‌ای که ذکر آن رفت، مثلاً فولادهایی که پوشش شیشه‌ای دارند، مایلار^۱ با پوششی از آلومینیم و شیشه‌ای که لایه‌هایی از پلاستیک دارد.

۱. نوعی پلاستیک قوی و شفاف.

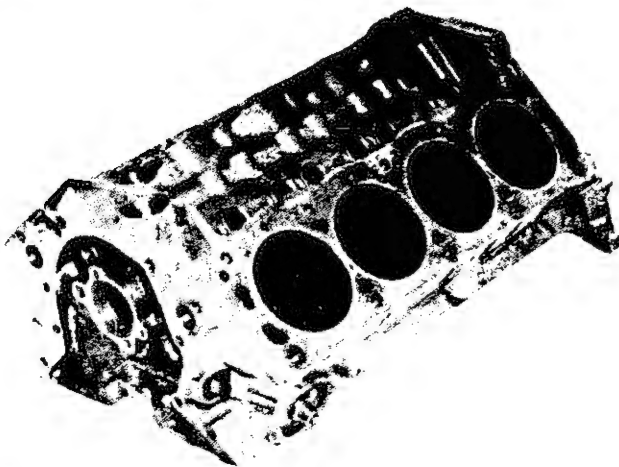
۱۲. تشخیص نقش مرز بین سطوح اجزا در ایجاد ماده چند سازه همدوس

۱۳. آشنا ساختن شما با قواعد مخلوط که در مورد ماده چندسازه ساده به کار می رود و در مورد آنها می توان خصوصیات هندسی تقویت کننده و زمینه را تعریف کرد.

۱-۱۳ چدن‌ها

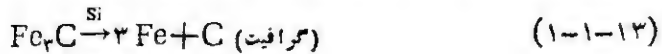
چدن‌ها در اصل آلیاژ اوتکتیک آهن و کربن اند، بنا بر این نقطه ذوب آنها نسبتاً پایین است (2200°F یا 1200°C ~). پایین بودن نقطه ذوب مزیت آنهاست، زیرا به آسانی ذوب می شوند و به سوخت کمتر و کوره ای با روش کار ساده تر نیاز دارند. همچنین فلز مذاب به آسانی، قالب پیچیده را کاملاً پر می کند. این ویژگیها سبب ارزانی ماده می شود و تسهیلات قابل ملاحظه ای در طراحی محصول فراهم می آورد (شکل ۱-۱۳-۱).

چدن‌ها از آلیاژهای اوتکتیک ساده ای که شرح داده شد پیچیده ترند. مثلاً بیشتر چدن‌ها ۱٪ تا ۳٪ سیلیسیم دارند. این تا حدی به سبب آن است که سیلیسیم در فرایند تولید با آهن باقی می ماند و برای جداسازی آن اقدامات بیشتری لازم است. ولی نقش سیلیسیم در محصول نهایی مهمتر است. در درجه اول، سیلیسیم استحکام فریت موجود در چدن را بالا می برد. در درجه دوم، با وجود سیلیسیم، ترکیب اوتکتیکی با نقطه ذوب پایین حاوی ۵٪ تا ۳٪ کربن به جای ۴٪ به دست می آید که در شکل ۱-۷-۹ دیده می شود. بالاخره



شکل ۱-۱۳-۱ بلوک موتور چدنی (۸-۷). چدن نه تنها یکی از فراوانترین و ارزانترین آلیاژهاست بلکه قابل ریخته گری به قطعات پیچیده نیز هست. بنابراین قطعات چدنی قبل از جمع کردن موتورهای (شکل ۱-۱-۱) به حداقل ماشینکاری نیاز دارند.

سیلیسیم موجب تجزیه کربید به آهن و گرافیت می شود



گرافیتی کردن. واکنش بالا در چدن، گرافیت تولید می کند، زیرا آهن کربید، Fe_3C ، در حقیقت پایدار نیست و فقط نیم پایدار است. در صورت وجود سیلیسیم و با قراردادن آن در دمای بالا ناپایداری آن شدت می گیرد.*

از آنجا که چدن گرافیتی می شود، باید به جای نمودار $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ نمودار فازی $\text{Fe}-\text{C}$ را به کار برد. این کار در شکل ۱۳-۲ انجام شده است. خوشبختانه اختلاف بسیار کم است و فقط یک تغییر مهم وجود دارد؛ گرافیت به جای Fe_3C قرار می گیرد! بنابراین در 400°C ، مقدار فریت در چدن حاوی ۳٫۵٪ کربن، برابر است با

$$\alpha = \frac{100 - 3.5}{100 - \sim 0} = 0.965$$

و نه

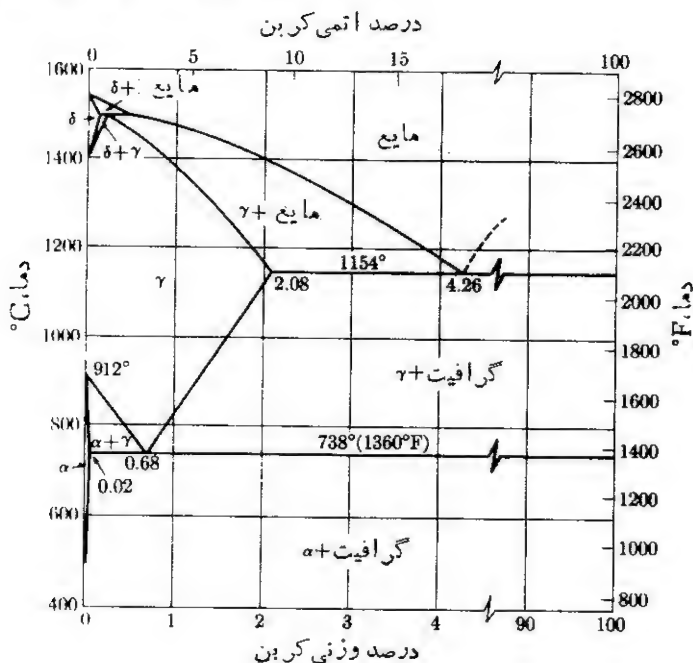
$$\alpha = \frac{67 - 3.5}{67 - \sim 0} = 0.948$$

اولی ۱۰۰٪ از کربن را به صورت ترکیب گرافیت به کار می برد؛ دومی ۶۷٪ از کربن را به صورت ترکیب Fe_3C در نظر می گیرد.

چدن خاکستری. چدنی که مقدار سیلیسیم آن بالا باشد (۲٪ \sim) سریعاً گرافیتی می شود به طوری که Fe_3C هرگز تشکیل نمی شود پوسته های گرافیتی در حین انجماد فلز تشکیل می شوند. این امر در شکل ۱۳-۳ دیده می شود. در اینجا این پوسته های گرافیتی را در مقطع دوبعدی فاز صیقل داده شده می بینیم. وقتی که این فلز در اثر کشش می شکند، مسیر

* قبلاً با فازهای نیم پایدار برخورد کرده ایم مثلاً تصور می شود که الماس «برای همیشه» پایدار است ولی اگر به آن فرصتی داده شود به گرافیت تبدیل می شود. الماس فقط وقتی پایدار است که در فشار و دمای بالا قرار گرفته باشد. همچنین مارتنزیت و شیشه دوفاز نیم پایدارند. مارتنزیت در اثر بازپخت به $(\alpha + \bar{\text{C}})$ تبدیل می شود و شیشه اگر فرصتی بدان داده شود به لورین خواهد شد. مسلماً زمان لازم برای این کار در دمای 200°C تقریباً بینهایت است.

نمودارهای شکل ۹-۷ و ۹-۳ را به کار بردیم زیرا در شرایط عادی کاربرد فولاد (Si) کم و زمان کوتاه یا متوسط گرمایش، گرافیتی شدن دیده نمی شود. بنابراین، فاز حاوی کربن در میکروساختار فولادها Fe_3C است که برخواص آنها نیز اثر می گذارد.



شکل ۱۳-۲ نمودار فاز $\text{Fe}-\text{C}$. نمودار فاز $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ (شکل ۹-۷-۱) در حقیقت نمودار تعادلی نیست، زیرا Fe_3C عاقبت به آهن و گرافیت تجزیه می‌شود، به‌ویژه در صورتی که چدن کربن بیشتری داشته باشد تنها تفاوت اساسی بین این نمودار و شکل ۹-۷-۱ این است که در آن طرف منحنیهای حدحالات کربن در فریت و کربن در استنیت، گرافیت به‌صورت فاز بر کربن وجود دارد.

شکست از پوسته‌ای به‌پوسته دیگر پیشروی می‌کند. زیرا گرافیت کسه شبیه به میکاست در کشش بسیار ضعیف است پس درصد خیلی بالایی از سطح شکسته شده، گرافیت است و به‌ظاهر خاکستری است. بنابراین چدن خاکستری نامیده می‌شود.

انعطاف‌پذیری چدن تقریباً قابل اغماض است زیرا پوسته‌های گرافیتی در آن موجودند، و ارزانی، مزیت آن است. علاوه بر این با وجود این پوسته‌های گرافیتی، چدن خاکستری انرژی ارتعاشی را بسیار خوب جذب می‌کند. در اصطلاح مهندسی لرزه می‌رایی آن بالاست. بنابراین، این نوع فلز به‌عنوان ماده اصلی ماشین‌ابزار و دستگاههای سنگین کاربرد وسیعی یافته است (شکل ۱۳-۱-۴).

چدن خاکستری به‌روشهای مختلف عملیات گرمایی می‌شود تا میکروساختار پرلیتی، فریتی، مارتنزیتی و بینیتی در فلز ایجاد شود. مثلاً اگر چدن خاکستری را تا تقریباً 750°C (1380°F) گرم کنیم، فازهای حاصل استنیت (750°C) و گرافیت خواهند بود. تقریباً آهسته سرد کردن آن، که طبق شکل ۹-۱۰-۹ شرح داده شد، از استنیت، پرلیت به‌وجود



شکل ۱۳-۱-۳ چدن خاکستری، بزرگنمایی ۱۰۰. کربن به صورت پوسته‌های گرافیتی وجود دارد. اگر مقدار کربن زیاد باشد ترکیب اوتکتیک تشکیل می‌شود که ریخته‌گری آن ساده و آلی استحکام و انعطاف پذیرش از فولادهای پرکربن کمتر است.

می‌آورد. کاربرد از گرافیت سریعتر تشکیل می‌شود زیرا به وسعت نفوذ کمتری نیاز دارد. به ویژه $(\alpha + \bar{C})$ بدون نفوذ اساسی آهن می‌تواند تشکیل شود. برعکس، نواحی گرافیتی شده در جسم جامد باید کاملاً از آهن تهی شود.

آب دادن از دمای 750°C تا دماهای پایین، از استنیت، مارتنزیت به وجود می‌آورد. از طرف دیگر آب دادن از 750°C تا دماهای متوسط و سپس بازپخت استنیتی (بخش ۵-۱۱) بینیت تولید می‌کند. در این حالتها بیش از مقداری که از اطلاعات قبلی ما در مورد پرلیت، مارتنزیت و بینیت انتظار می‌رود، استحکام و سختی چدن خاکستری پرلینی، چدن خاکستری بینیتی (جدول ۱۳-۱-۱) با یکدیگر تفاوت دارند.

اگر سیلیسیم اندکی افزایش یابد تا گرافیتی شدن کامل چدن در 700°C ($\sim 1000^{\circ}\text{F}$) تسهیل شود، میکروساختار دیگری وجود خواهد داشت که عبارت است از فریت و گرافیت. این چدن خاکستری فریتی چدنی نرم و قابل ماشینکاری است و احتیاجات بسیاری را با هزینه کم برطرف می‌کند، برای اجتناب از تشکیل کاربرد باید آن را از 700°C به آهستگی سرد کرد.



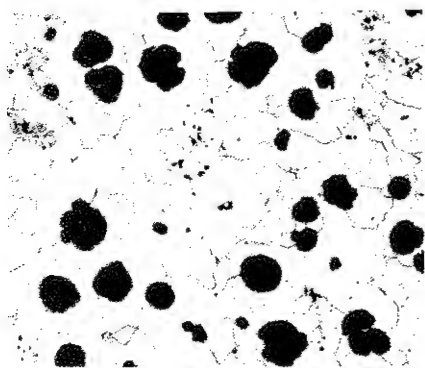
شکل ۱۳-۱-۴ لرزه میرایی نسبی فولاد و چدن. ارتعاشات در چدن بسیار سریعتر روبه‌زوال می‌گذارند، زیرا پوسته‌های گرافیتی انرژی ارتعاشی را جذب می‌کنند.

چدن کروی (انعطاف پذیر). آزمایشهای دقیق نشان داد که اگر مقدار کمی منیزیم یا سربیم به فلز مذاب اضافه کنیم به جای میکروساختار چدنهایی که به آسانی گرافیتی می‌شوند (شکل ۱۳-۱-۳) می‌توان آنچه را که در شکل ۱۳-۱-۵ دیده می‌شود به دست آورد. کره‌های گرافیتی (یا ذرات کروی) حاصل به‌طور مؤثری بر انعطاف پذیری چدن اثر می‌گذارد. (جدول ۱۳-۱-۱)، در حالی که چدن خاکستری معمولی اصلاً انعطاف پذیر نیست، این چدن کروی می‌تواند ۱۵٪-۲۵٪ ازدیاد طول داشته باشد. اگر چه توضیح این متغیر میکروساختار پیچیده است، ولی در عمل آثار آن فوق‌العاده است، زیرا در کاربردهایی مانند میل‌لنگ، که در آن شکست ترد موجب فاجعه می‌شود، استفاده از چدن را ممکن می‌سازد.

چدن کروی را مثل چدن خاکستری می‌توان با عملیات گرمایی، فریتی یا پرلیتی کرد یا مارتنزیت بازپخت شده در آن به وجود آورد. اولی انعطاف پذیرتر است و دومی محصول ریخته شده فوق‌العاده محکمی به وجود می‌آورد (جدول ۱۳-۱-۱).

چدن چکش‌خوار. دیدیم که چدن با ۳٪-۳۵٪ کربن و ۲٪-۲۵٪ سیلیسیم فوراً گرافیتی می‌شود. فولادها نوعاً (۰.۲۵٪ Si و ۱٪ C <) در شرایط عادی گرافیتی نمی‌شوند. همان‌طور که انتظار می‌رود ترکیبات میانی به‌صورت بینابینی رفتار می‌کنند، ولی کاربرد محصول تاحد زیادی به چگونگی تنظیم ترکیب آن، سرعت سرد کردن و عملیات گرمایی بعدی بستگی دارد. مثلاً چدن با ۲.۲۵٪ کربن و ۱٪ سیلیسیم اگر سریع منجمد شود یعنی در حین انجماد فاز نیم پایدار Fe_3C تشکیل شود و فرصتی برای گرافیتی شدن پس از انجماد به آن داده نشود، چدن سفید به وجود می‌آورد.

چدن سفید.* در بعضی قطعات مقاوم به سایش کاربردهایی یافته است، زیرا کاربید به مقدار زیاد (تقریباً ۳۵ درصد حجمی محصول)، کاملاً در مقابل سایش مقاوم است. ولی اگر این فلز تسابکاری شود و چدن چکش‌خوار به وجود آید کاربرد گسترده‌تری می‌یابد.



شکل ۱۳-۱-۵ چدن کروی، $\times 100$. کربن به‌صورت کره‌های گرافیتی وجود دارد. برخلاف چدن خاکستری، چدن کروی انعطاف پذیر است (جدول ۱۳-۱-۲). گرافیت در حین انجماد هم در چدن خاکستری و هم در چدن کروی تشکیل می‌شود.

* سطح مقطع شکست آن به جای خاکستری، سفید فلزی است.

جدول ۱-۱۳ خواص چدن آلیاژ ننده^۰

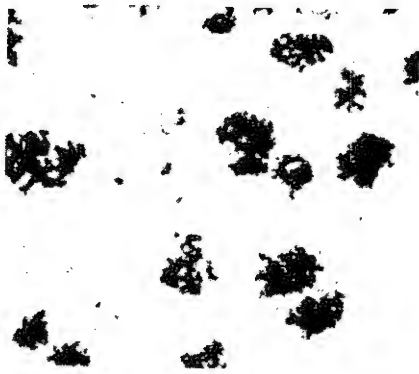
کمیته خواص مکانیکی

چدن	نوع	S_t	S_y	ازدیاد طول (۵cm)	کاربرد
خاکستری (۳۰۲C-۲Si)	پر لیتی	۲۷۵ MPa	۲۴۰ MPa	$< 1\%$	بدنه موتور
	مارنریتی	۵۵۰	۵۵۰	صاف	سطوح سایشی
	بینشی	۵۵۰	۵۵۰	صاف	میل بادامک
	فریتی [*]	۱۷۲	۱۳۸	$< 1\%$	لوله، پایه ماشین
کروی ^{۰۰} (۳۰۵C-۲۰۵Si)	فریتی	۴۱۳ MPa	۲۷۵ MPa	۱۸	لوله
	پر لیتی	۵۵۰	۳۸۰	۶	میل لنگ
	مارتنزیت باز پخت شده	۸۲۵	۶۲۰	۲	قطعات مخصوص ماشین

فلز آلات	۱۸	۲۲۰ MPa	۳۶۵ MPa	فریتی	چکش خوار (۲۲C-۱ Si)
تجهیزات راه آهن	۱۰	۳۱۰	۴۵۰	پر لیتی	
تجهیزات راه آهن	۲	۵۵۰	۷۰۰	مارتزیت بازیخت شده	
محصولات مقاوم به سایش	صفر	۲۷۵ MPa	۲۷۵ MPa	ریخته شده (پر لیتی)	سفید (۳۵C-۵ Si)

* معمولاً چدن فریتی تقریباً ۳۵٪ کربن و ۲۵٪ سیلیسیم دارد.

** چدن انعطاف پذیر نیز نامیده می شود.



شکل ۱۳-۱-۶ چدن چکش خوار، $\times 100$.
 کربن به صورت خوشه‌های گرافیت (کربن بازپخت شده) موجود است. در نتیجه تا میزان قابل توجهی انعطاف پذیری است (۳-۱-۱۱).
 خوشه‌های گرافیت توسط واکنش در حالت جامد، طبق روابط (۲-۱-۱۱) و (۳-۱-۱۱) تشکیل می‌شوند.

این مطلب در بخش ۱-۱۱ نیز ذکر شده است. با تابکاری چدن سفید، Fe_3C تجزیه و به آهن و گرافیت تبدیل می‌شود. از آنجا که واکنش بدون وجود مایع صورت می‌گیرد، گرافیت حاصل نه پوسته‌ای شکل است (شکل ۱۳-۱-۳) و نه کروی (شکل ۱۳-۱-۵). بلکه به صورت «خوشه‌ای» در داخل فلز جامد رشد می‌کند (شکل ۱۳-۱-۶). این گرافیت مانند لبه‌های پوسته‌های گرافیت در مقیاس میکروسکوپی «ترک دوست» نیست بنابراین فلز تا حدی انعطاف پذیر باقی می‌ماند (جدول ۱۳-۱-۲) و همان‌طور که از اسمش پیداست از چدن خاکستری، چکش خوارتر است.

همان‌طور که از معادلات (۲-۱-۱۱) و (۳-۱-۱۱) برمی‌آید، می‌توان چدن چکش خوار فریتی یا چدن چکش خوار پرلیتی تولید کرد. علاوه بر این آب دادن و بازپخت مناسب می‌تواند به تولید قطعات ریختگی نسبتاً محکم و ارزانی منجر شود که در راه آهن و تجهیزات مشابه آن قابل استفاده باشد.

لازم است در طراحی به محدودیتی، که ویژه چدن چکش خوار است توجه داشته باشیم. از آنجا که انجماد باید به حد کافی سریع انجام شود تا ابتدا چدن سفید تشکیل شود، این قطعات ریختگی نمی‌توانند مقلع ضخیم داشته باشند. در غیر این صورت در مدتی که

جدول ۱۳-۱-۲ انعطاف پذیری آلیاژهای فریتی

انعطاف پذیری

نوع	% ازدیاد طول (۵ cm)	شماره شکل
چدن فریتی	۴۰-۵۰	۹-۸-۲ (الف)
چدن فریتی کروی	۱۵-۲۰	۱۳-۱-۵
چدن فریتی چکش خوار	۱۵-۲۰	۱۳-۱-۶
چدن فریتی خاکستری	< ۱	۱۳-۱-۳

چدن، بتن، چوب و مواد چندسازه ۵۹۷

برای انجماد لازم است پوسته‌های گرافیتی تشکیل خواهد شد. بسته به مقدار سیلیسیم و ضریب رسانندگی گرمایی دیواره قالب، بیشینه ضخامت قطعات ریختگی چدن چکش‌خوار معمولاً به $30\text{mm}-20\text{mm}$ محدود می‌شود.

مثال ۱-۱-۱۳ نمودار مقدار فریت و استنیت بر حسب دما را برای چدن حاوی ۲٫۵٪ کربن، ۱٪ سیلیسیم و بقیه آهن، رسم کنید.

الف) برای چدن سفید؛ ب) برای چدن چکش‌خوار با کربن آزاد.

حل: سیلیسیم در فریت و استنیت حل می‌شود. بنابراین ترکیب آن را تقریباً برابر $Fe-2.5C$ در نظر می‌گیریم.

الف) از شکل ۱-۷-۹ که نمودار $Fe-Fe_3C$ است استفاده کنید.

$$\alpha = (67 - 2.5) / (67 - 0) = 0.63 \quad \text{در } 700^\circ C \text{ (و پایین‌تر از آن)}$$

$$\gamma = (67 - 2.5) / (67 - 1.0) = 0.74 \quad \text{در } 800^\circ C$$

و غیره
شکل ۱-۷-۹ را ببینید.

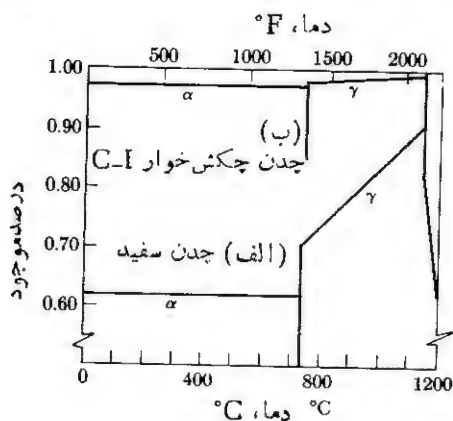
ب) از شکل ۲-۱-۱۳ که نمودار $Fe-C$ است استفاده کنید.

$$\alpha = (100 - 2.5) / (100 - 0) = 0.975 \quad \text{در } 700^\circ C \text{ و پایین‌تر از آن}$$

$$\gamma = (100 - 2.5) / (100 - 0.95) = 0.985 \quad \text{در } 800^\circ C$$

و غیره
شکل ۲-۱-۱۳ را ببینید.

توضیح: سیلیسیم مانند تمام عناصر، نقطه اوتکتوئید را به نقطه‌ای با درصد کربن کمتر انتقال می‌دهد. (بخش ۹-۹) این امر حلالیت کربن در استنیت را تا حدی کاهش می‌دهد. بنابراین منحنیهای شکل ۱-۷-۹ برای γ اندکی بالاست.



شکل ۱-۷-۹ کسر فازها (چدن با ۲٫۵٪ کربن)، فاز دوم در چدن سفید الف) کاربید است در دمای زیر نقطه اوتکتیک (شکل ۱-۷-۹). پس از چکش‌خوار کردن؛ ب) فاز دوم زیر دمای اوتکتیک، گرافیت است (شکل ۲-۱-۱۳). (مثال ۱-۱-۱۳ را ببینید.)

مثال ۱۳-۱-۲ چگونگی عملیات گرمایی برای تولید چدن کروی حاوی مارتنزیت باز پخت شده (۳C-۲Si-۹۵ Fe) را بنویسید. چه عواملی باعث می شود که این عملیات با عملیات مشابه در مورد فولاد ۱۰۸۰ تفاوت کند؟

دوش و توضیح.

الف) ذوب، $1300^{\circ}\text{C} \sim (2400^{\circ}\text{F})$ به فلز باید منیزیم (یا سریم) تلقیح شود تا در حین انجماد کره های گرافیتی تشکیل شوند. دمای ذوب آن از فولاد کمتر است، زیرا کربن بیشتری وجود دارد.

ب) استنیتی کردن، $800^{\circ}\text{C} (1475^{\circ}\text{F})$ ، از آنجا که ۲٪ سیلیسیم موجود است، دمای اونکتوئید و ترکیب آن به ترتیب 775°C و 55% است (شکل ۹-۹-۱).

استنیت ($55\% \sim$) + گرافیت (100%)

ج) آب دادن در روغن تا دمای محیط. ۲٪ سیلیسیم سختی پذیری فولاد را به طور محسوسی افزایش می دهد. بنابراین آب دادن در روغن امکان پذیر است و احتمال ترک خوردگی را کاهش می دهد، مارتنزیت ($55\% \sim$) + گرافیت (100%).

د) باز پخت کردن در مت مثل فولاد ۱۰۵۵.

فریت (بدون C) + کاربید (67%) + گرافیت (100%)

مثال ۱۳-۱-۳ چگالیهای چدن سفید و چدن فریتی چکش خوار در مثال ۱۳-۱-۱ را با هم مقایسه کنید. با ۱٪ Si

$$\rho_{\alpha} = 7.78 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{Fe}_3\text{C}} = 7.6 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{گرافیت}} = 2.2 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{یا } 2.2 \text{ Mg/m}^3)$$

حل: مبنا: ۱۰۰ g و با به کار بردن g/cm^3 .

چدن سفید، 3α و $37\text{Fe}_3\text{C}$ (مثال ۱۳-۱-۱)

$$\frac{63 \text{ g } \alpha}{7.78 \text{ g/cm}^3} = 80.8 \text{ cm}^3 \alpha \quad \text{و}$$

$$\frac{37 \text{ g Fe}_3\text{C}}{7.6 \text{ g/cm}^3} = 48.7 \text{ cm}^3 \text{Fe}_3\text{C} \quad \text{و}$$

$$\rho_{\text{چدن سفید}} = 100 \text{ g } (80.8 + 48.7 \text{ cm}^3)$$

$$= 772 \text{ g/cm}^3 \text{ (یا } 772 \text{ Mg/m}^3 \text{)}$$

فربتی چکش خوار: $\alpha 975$ و 25 گرافیت (مثال ۱۳-۱-۱)

$$\frac{975 \text{ g } \alpha}{778 \text{ g/cm}^3} = 1250 \text{ cm}^3 \alpha$$

و

$$\frac{25 \text{ g گرافیت}}{22 \text{ g/cm}^3} = 114 \text{ cm}^3 \text{ گرافیت}$$

$$\rho_{\text{چدن فربتی چکش خوار}} = \frac{100 \text{ g}}{1250 + 114 \text{ cm}^3}$$

$$= 733 \text{ g/cm}^3 \text{ (یا } 733 \text{ Mg/m}^3 \text{)}$$

توضیح. در حین چکش خوار کردن انبساط حجمی به وجود می آید که در کنترل فرایند باید در نظر گرفته شود. ▲

□ ۱۳-۲ بتن (و محصولات مربوط به آن)

عموماً اطلاع داریم که سازه های مهندسی مثل ساختمانها، پلها و بزرگراهها را می توان از سنگریزه، ماسه و سیمان ساخت. محصول یکپارچه حاصل بتن* نامیده می شود. مشخصات ویژه بتن به ماهیت کلوخه و ماهیت خمیر** آب-سیمان مخلوط شده با آن و مسلماً به مقدار نسبی آنها بستگی دارد. به عبارت دیگر، خواص آن درست مانند هر ماده دیگر توسط ساختار داخلی آن تعیین می شود.

کلوخه ها. البته ماسه و سنگریزه باید مواد با دوامی مثل کوارتزیت، سنگ آهک خرد شده یا بازال باشد و باید استحکام آنها از استحکامی که در نهایت از بتن انتظار می رود بیشتر باشد. در غیر این صورت، اگر سنگ لوح (یا سنگ شکننده دیگری نظیر آن) وجود داشته باشد، در کلوخه شکستگی به وجود می آید، حتی اگر افزوده های سیمانی آن بهترین فرمولبندی را داشته باشد. کدهای بتن کیفیت کلوخه ها را مشخص می کنند. مثلاً ASTM-C ۸۸. علاوه بر این اندازه گیری اندازه کلوخه ها نیز برای کار مهندس لازم است. این کار توسط آنالیز با سرنده انجام می شود. معمولاً دو مجموعه سرنده برای آنالیز

* سیمان به ماده ای گفته می شود که برای چسبندگی بتن به کار می رود و نه به محصول نهایی.

** وقتی ۴۰ تا ۷۰ درصد واحد (وزنی) آب با یک واحد سیمان مخلوط می شود. محصول ابتدا قوام خمیری دارد. بتن را می توان مخلوط این خمیر با کلوخه ها در نظر گرفت. این خمیر اندک اندک توسط آبدار کردن سخت می شود.

با سرند به کار می رود (جدول ۱-۲-۱۳) که به طور کلی قابل مقایسه با یکدیگرند. برای شاخصهای بتن بیشتر مجموعه آمریکایی سرندها با اندازه های مختلف به کار می رود.

جدول ۱-۲-۱۳ مجموعه های سرند که در آنالیز ذرات به کار می رود (سوراخها)

مجموعه آمریکایی		مجموعه نایلر	
۱۷۵	۳۸ mm	۱۷۵	۳۸ mm
۱	۲۶۷	۱	۲۵۷
$\frac{3}{4}$	۱۸۹	$\frac{3}{4}$	۱۹۱
$\frac{1}{2}$	۱۳۳	$\frac{1}{2}$	۱۲۷
$\frac{3}{8}$	۹۴	$\frac{3}{8}$	۹۵
شماره ۳	۶۷		
۴	۴۷	شماره ۴	۴۷۵
۶	۳۳		
۸	۲۳۶	۸	۲۳۸
۱۰	۱۶۶		
۱۴	۱۱۸	۱۶	۱۱۹
۲۰	۰۸۳		
۲۸	۰۵۹	۳۰	۰۵۹
۳۵	۰۴۲		
۴۸	۰۲۹۵	۵۰	۰۲۹۷
۶۵	۰۲۰۸		
۱۰۰	۰۱۴۷	۱۰۰	۰۱۵۰

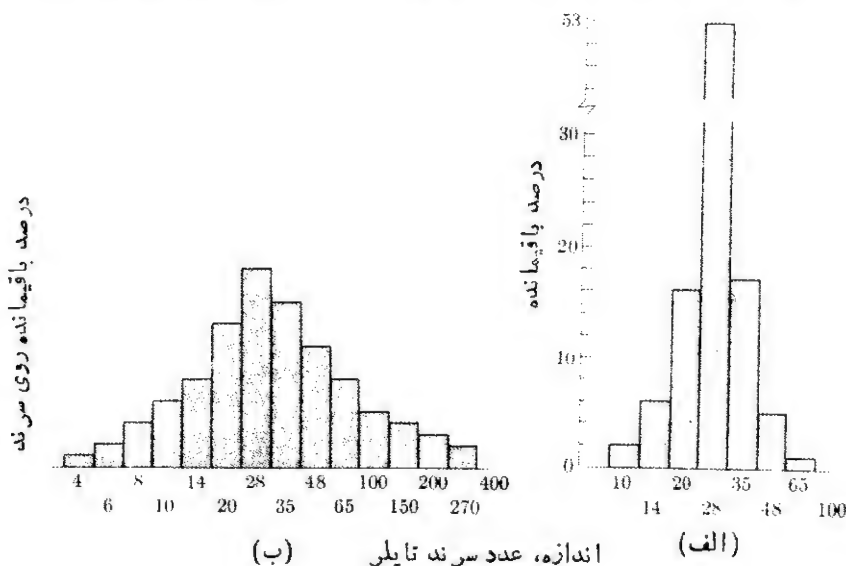
•

* مجموعه ها تا شماره ۴۰۰ با سوراخ ۰۳۷ میلی متر ادامه دارد و بر مبنای $\sqrt{2}$ تغییر می کنند.

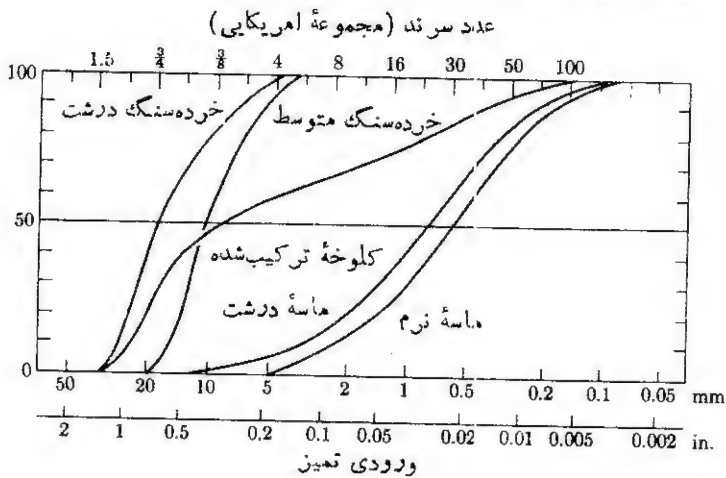
مجموعه‌های تایلر که بر مبنای $\sqrt{3}$ تنظیم شده است بیشتر در صنعت سرامیک کار برد دارد. میانگین اندازه ذرات تنها از اهمیت محدودی برخوردار است. مثلاً محدوده توزیع ذرات می‌تواند بسیار باریک باشد مثل انواع ماسه‌های ساحلی، یا خیلی پهن باشد مثل ماسه رودخانه و لی میانگین اندازه آنها یکی باشد (شکل ۱۳-۲-۱). مهندسان معمولاً به نسبت کمی موادی که روی سرندهای متوالی باقی می‌مانند توجه نشان می‌دهند. چندین آنالیز از این نوع در شکل ۱۳-۲-۲ دیده می‌شود.

چگالی فشردگی و تخلخل نیز مهم اند. شکل ۱۳-۲-۳ نشان‌دهنده چند تقسیم‌فرعی در حجم است که در مقدار آب و یا خمیرسیمانی که می‌تواند با کلوخه پیوند تشکیل دهد، اثر دارند. منقذهای بسته (داخلی) نفوذناپذیرند. در کلوخه‌های مصنوعی سبک‌وزن و در بعضی کلوخه‌های بازالتی خرد شده به این نوع منقذها برمی‌خوریم. منقذهای باز حفره‌های نفوذپذیرند. این منقذها ترکهای مویی شیارها و بی‌نظمیهای زاویه‌ای شکل ذرات کلوخه را شامل می‌شوند. علاوه بر این در میان ماسه، سنگریزه و غیره ممکن است مقدار زیادی تخلخل بین ذراتی که به صورت منقذهای باز است وجود داشته باشد.

این منقذها سبب تعریف چندنوع حجم می‌شوند. حجم حقیقی حجم ذاتی ماده است. حجم ظاهری مجموع حجمهای حقیقی و حجم منقذهای بسته است. حجم انباشتی نه تنها شامل حجم منقذهای بسته است (و حجم حقیقی) بلکه منقذهای باز را نیز شامل می‌شود بنابراین برای تعریف حجم کل باید مبنای خود را تعریف کنیم. اگر فقط ذرات کلوخه‌ها



شکل ۱۳-۲-۱ توزیع اندازه ذرات. الف) درجه بندی باریک مثل ماسه ساحلی؛ ب) درجه بندی پهن مثل ماسه رودخانه.



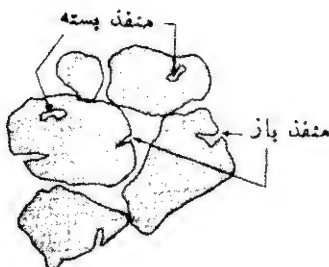
شکل ۱۳-۲-۲ آنالیز انواع کلوخه‌هایی که برای مخلوط‌های بتن به کار می‌رود. کلوخه مرکب مخلوطی از سنگریزه درشت (۶۰٪) و ماسه (۴۰٪) است. این ترکیب فضاها را کاملتر از سنگریزه تنها یا ماسه تنها پرمی‌کند.

در نظر گرفته می‌شوند، منفذهای باز به ترک‌های کوچک و ترک‌های مویی محدود می‌شوند. اگر مبنای ما برای حمل و نقل توده مواد باشد، حجم کل باید شامل مقدار نسبتاً زیاد تخلخل‌های بین‌ذرات نیز بشود.

این حجمها موجب به‌وجود آمدن دو نوع تخلخل یعنی حقیقی (بسا کل) و ظاهری (یا باز) می‌شود

$$\frac{\text{حجم منفذهای باز} + \text{حجم منفذهای بسته}}{\text{حجم کل}} = \text{تخلخل کل} \quad (۱۳-۲-۱)$$

$$\frac{\text{حجم منفذهای باز}}{\text{حجم کل}} = \text{تخلخل ظاهری} \quad (۱۳-۲-۲)$$



شکل ۱۳-۲-۳ فضای منفذ (طرحواره).

منفذهای بسته، منفذهای داخلی و بنابراین نفوذناپذیرند. منفذهای باز، منفذهای نفوذپذیرند. منفذهای باز شامل فضای بین ذرات (تخلخل بین ذرات)، به علاوه ترک‌های کوچک و ترک‌های مویی است که به داخل ذرات کلوخه‌ها پیشروی می‌کنند.

در هر صورت، باید مبنای حجم کل را تعریف کنیم، چه حجم ذرات کلوخه باشد و چه حجمی که حفره‌های پر نشده بین ذرات کلوخه را شامل شود. سه چگالی اصلی نیز وجود دارد

$$(۱۳-۲-۳) \quad \text{چگالی حقیقی} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم حقیقی}}$$

$$(۱۳-۲-۴) \quad \text{چگالی ظاهری} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم ظاهری}}$$

$$= \frac{\text{جرم}}{\text{حجم حقیقی} + \text{حجم منفذهای بسته}}$$

$$= \frac{\text{جرم}}{\text{حجم منفذهای باز} - \text{حجم کل}}$$

$$(۱۳-۲-۵) \quad \text{چگالی انباشتی} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم کل}}$$

در اینجا باز باید مبنای خود را برای حجم کل تعریف کنیم و معین کنیم که آیا فقط کلوخه را در نظر می‌گیریم یا فضای موجود بین ذرات، که با مواد توده همراه اند، را نیز در نظر داریم.

سیمان. اساساً استحکام خمیر سخت‌شده سیمان در آب استحکام بتن را تثبیت می‌کند زیرا در یک کلوخه محکم هر نوع شکستی بین ماسه و یا ذرات سنگی صورت می‌گیرد. بنابراین اصولاً راهی که فقط از مخلوط سیمان و آب ایجاد شده است می‌تواند به همان استحکامی باشد که وقتی مخلوط کلوخه نیز داشته باشد. ولی هزینه آن بسیار گزاف خواهد بود. بنابراین مخلوط سیمان و آب با مواد کلوخه‌ای ارزانتر و قویتر، «رقیق» می‌شود.

در حقیقت بتن حاوی سنگریزه یا سنگ خرد شده همراه با ماسه، پرکننده فضاهای بین آنهاست، در این حالت سیمان و آب فضای بین دانه‌های ماسه را پر می‌کنند. در عمل مقداری ماسه اضافی نیز برای اطمینان از پر شدن کامل فضای بین سنگریزه‌ها لازم است (شکل ۱۳-۲-۴) همچنین، تقریباً ۱۵ درصد خمیر سیمان بیشتر از مقدار نظری آن، برای فضای بین دانه‌های ماسه لازم است. در غیر این صورت اگر مخلوط کردن به‌طور کامل انجام نشود ممکن است تعدادی حفره موضعی باقی بماند.

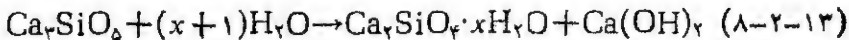
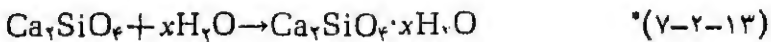
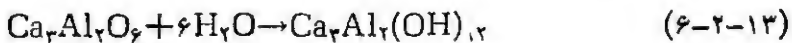
آبدار کردن سیمان. سیمانی که تقریباً در تمام بتن‌ها به کار می‌رود سیمان پرتلند* نامیده

* اولین بار در حدود قرن هیجدهم در جزیره پرتلند ساخته شد.



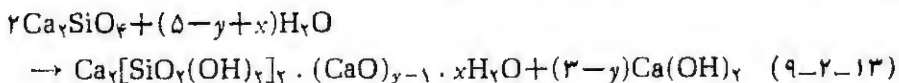
شکل ۱۳-۲-۴ سطح مقطع بتن (۱۵×). فضای بین سنگریزه‌ها با ماسه پر شده است. فضای بین ماسه‌ها با خمیر سیمان پر تلند آبدار پر شده است.

می‌شود و این ماده اصولاً مخلوطی از کلسیم سیلیکات‌ها و کلسیم آلومینات است که در حضور آب، آبدار شده است.

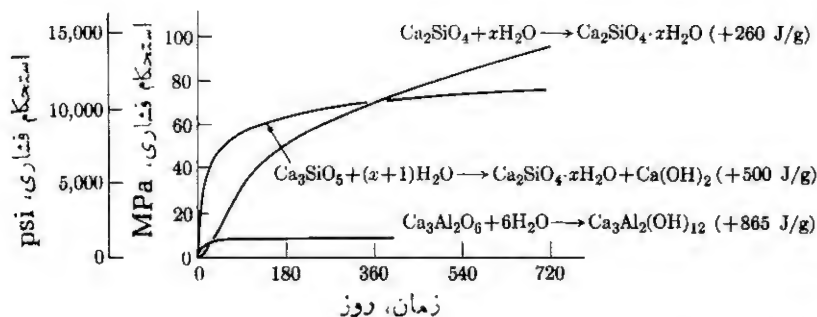


در هر صورت محصول آبدار نسبت به سیمان اولیه حلالیت کمتری در آب دارد. بنا بر این در صورت آب واکنشهای فوق یکی از واکنشهای حل و رسوب مجدد است. هر یک از این واکنشها تأکیدی است بر این مطلب که سیمان با خشک کردن سخت نمی‌شود. بلکه با واکنش شیمیایی آبدار کردن سخت می‌شود، در حقیقت لازم است بتن را مرطوب نگه داشت تا از خودگیری صحیح آن اطمینان حاصل شود. واکنشهای آبدار کردنی که در بالا شرح داده شد مطابق شکل ۱۳-۲-۵ گرمازا هستند. اگر لازم باشد که بتن را در دماهایی که اندکی زیر نقطه انجماد آب است بریزند، مهندسان در هوای سرد از این خاصیت بهره‌می‌گیرند. برعکس گرمای حاصل از آبدار کردن در هنگامی که بتن در سازه‌های پر حجمی مثل سد ریخته می‌شود، مسئله‌ای به حساب می‌آید. در این شرایط فوق‌العاده، لازم است به‌طور مخصوصی آن را سرد کرد و از لوله‌هایی که در داخل آن کار گذاشته شده است خشک‌کننده‌ای عبور داد، این لوله‌ها در محل باقی خواهند ماند و بعداً به‌عنوان تقویت‌کننده عمل خواهند کرد.

* صحیحتر است که این واکنش به صورت زیر نوشته شود



در اینجا x با فشار جزئی آب تغییر می‌کند و y تقریباً ۲٫۳ است. رابطه (۱۳-۲-۸) را نیز می‌توان مشابه همین تعریف کرد.

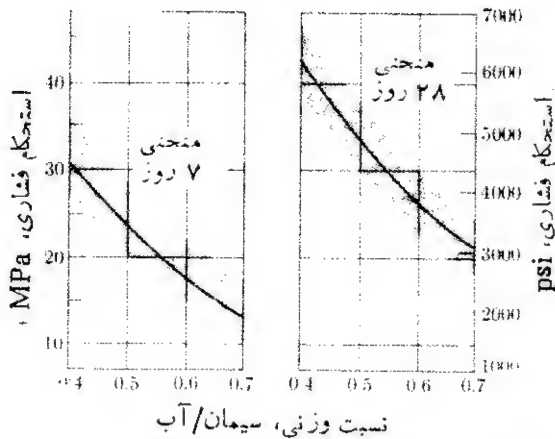


شکل ۱۳-۲-۵ آبدار کردن و محکم شدن سیمان (ترکیبات سیمان پرتلند). برای افزایش استحکام، باید آب وجود داشته باشد تا آبدار شود. بتن پساخشک شدن خود را نمی گیرد. همان طور که گفته شد در حین آبدار کردن گرما بیرون داده می شود. از بین بردن گرمای حاصل در سازه های بزرگمانند سدها محتاج شرایط ویژه ای است.

متغیرهایی که شرح داده ایم نشان می دهند که می توان انواع متنوع سیمان را برای به دست آوردن مشخصات مختلف به کار برد. مثلاً سیمانی که مقدار تری کلسیم سیلیکات (Ca_3SiO_5) آن بیشتر باشد به سرعت خود را می گیرد و زود استحکام به دست می آورد.* برعکس در شرایطی که گرمای واکنش ممکن است مشکلاتی به وجود آورد و مدت زمان بیشتری برای خودگیری در اختیار است، سیمان غنی از Ca_2SiO_4 به کار می رود. انجمن امریکایی آزمایش و مواد (ASTM) انواع سیمانهای زیر را در فهرستی ذکر کرده است: (۱) نوع I، در ساختمانهای بتنی معمولی به کار می رود که در آنها خواص ویژه ای مورد نیاز نیست. (۲) نوع III، وقتی به کار می رود که استحکام سریع بتن مطلوب باشد. (۳) نوع IV، وقتی استفاده می شود که گرمای آبدار کردن اندکی لازم باشد. دو نوع دیگر نیز وجود دارد (II و V) این دو در موارد بخصوصی به کار می روند که خوردگی سولفات در طراحی مورد نظر باشد.

مخلوطهای بتن. نسبت مخلوطهای بتن معمولاً بر اساس مقدار سیمان به کار رفته تعیین می شود. بنابراین می توان مخلوط ۳۱ سنگریزه-۶۰۲ ماسه-۱ سیمان-۵۵ ریزه آب را بر اساس وزن تعیین کرد (یا این مقادیر را به حجمهای مربوط به آنها تبدیل کرد). ابتدا خواهیم دید که نسبت سیمان به آب برای استحکام بتن بحرانی است (شکل ۱۳-۲-۶). از آنجا که آب اضافی وارد واکنش آبدار کردن نمی شود، فضایی را اشغال خواهد کرد و از پیوند جامد به جامد جلوگیری خواهد کرد. اگر آب اضافی سرانجام تبخیر

* با آسباب کردن سیمان و تبدیل آن به ذرات ریز نیز می توان سیمانی به دست آورد که خیلی زود محکم می شود.



شکل ۱۳-۲-۶ استحکام بتن بر حسب نسبت آب به سیمان [سیمان پرتلند نوع I، عمل آمده در رطوبت در 20°C (68°F)]. برای تأمین کارپذیری مخلوط و کسب اطمینان از اینکه اشکال پیرشده اند، بی آنکه حفرةای وجود داشته باشد، باید آب کافی موجود باشد. واضح است که آبزیادی به فضای اضافی نیاز دارد یعنی در این حالت چسبندگی کمتر است.

شود، ترکهای مویی باقی خواهند ماند. بنابراین مخلوط با کمترین نسبت ممکن سیمان به آب ساخته می شود، ولی حدی وجود دارد. باید آب کافی موجود باشد تا بتن را کارپذیر کند و بتن بتواند بدون حفرة، قالب را کاملاً پر کند. روشهای ارتعاشی به پر کردن قالب کمک می کنند، همچنین فرستادن حبابهای هوا (به قطر تقریباً ۱ میلی متر) به داخل بتن با استفاده از عاملهای هواده کارپذیری آن را افزایش می دهد (و بنابراین مقدار آب لازم را کمتر می کند) این حفرةهای کروی به اندازه ترکهای مویی که پس از تبخیر آب اضافی به وجود می آیند، بتن را ضعیف نمی کنند.*

حبابهای هوا که عاملهای هوادهنده وارد بتن می کنند نیز مقاومت بتن را در برابر فساد حاصل از انجماد و میعان آب در داخل منفذها افزایش می دهند. در نتیجه ویژگی تقریباً تمام به تنهایی که در سنگ فرش جاده های نواحی سردسیر، به کار می روند، این است که عاملهای هواده دارند.

حجم مخلوط بتن را از حجم کلوخه ها، سیمان و آب افزوده شده می توان محاسبه کرد. مطابق مثال ۱۳-۲-۳، فرض می کنیم که ماسه فضای بین سنگریزه ها را (بیش از اندازه) پر خواهد کرد و قسمتهای سیمان و آب فواصل بین ماسه را بیش از اندازه پر خواهند کرد. بالاخره می توان حجم هوایی که عاملهای هواده وارد بتن می کنند را تنظیم کرد.

* به اثر دانه های کروی گرافیت و پوسته های گرافیتی در استحکام چند (بخش ۱۳-۱) رجوع کنید.

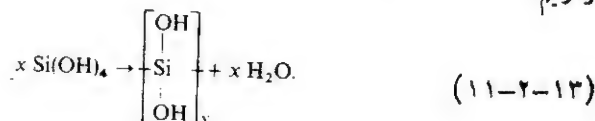
چگالی و تخلخل محصول بتنی ممکن است به حجمهای مختلف آن محصول یعنی حجمهای حقیقی، ظاهری و کل (روابط ۱۳-۲ تا ۱۳-۵) بستگی داشته باشد. در بین خصوصیات بتن به ترتیب چگالی و تخلخل اهمیت بیشتری دارند. مثلاً گرمای تلف شده از میان دیوار تابعی از حجم حقیقی (و کل تخلخل) است، در حالی که نودپذیری دیوار نسبت به آب به مقدار تخلخل ظاهری (باز) بستگی دارد.

سیمانهای دیگر. سیمان پرتلند در ظرفیتهای بالا تولید می شود. البته سیمانهای دیگری نیز وجود دارند. سنگ گچ و آهک نیز سیمانهای هیدرولیکی اند. مثلاً سنگ گچ (گچ پاریس) به صورت زیر عمل می کند



اصولاً مکانیسم سخت کردن آن شبیه به سیمان پرتلند است. زیرا ترکیب اولیه به شکل آبدار شده حل می شود و مجدداً رسوب می کند.

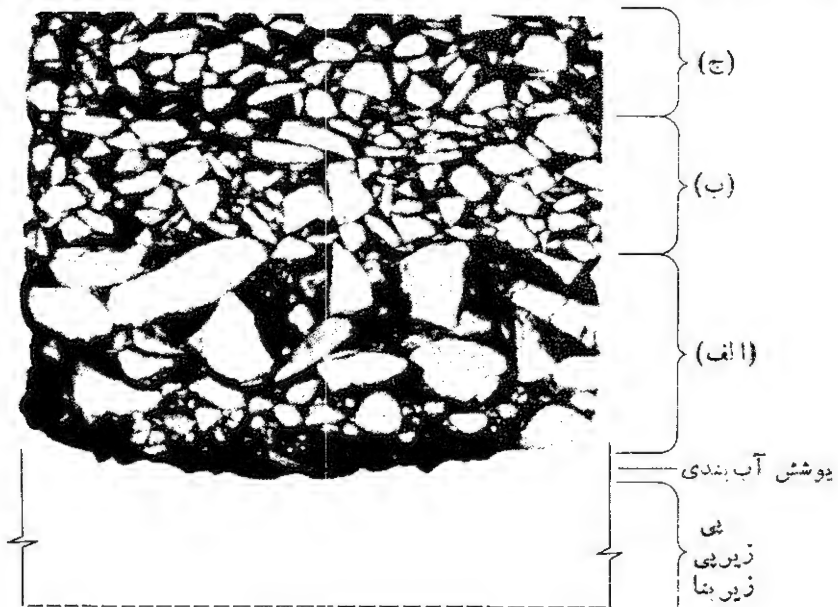
سیمانهای پلی مری، واکنش پلی مرکردن را شامل می شوند؛ در مورد اسید سیلیسک داریم



در این مثال واکنش پلی مرکردن واکنش تراکمی است. واکنش فوق وقتی که آنقدر گسترده می شود تا دو رادیکال OH باقیمانده را نیز دربر بگیرد بسک ساختار بی شکل سیلیسی SiO_2 را ایجاد می کند. واکنشهای پیچیده تر دیگری در سیمانهای آبوکسی رخ می دهد. بعضی از آنها پیوندهای فوق العاده قوی به وجود می آورند.

پیوند توسط مواد گرما نرم نیز به دست می آید. آسفالت جزء این دسته است و در کمیتهای کیلوتنی برای بزرگراهها استفاده می شود. آسفالت اصولاً برای تأمین چسبندگی کلونچه ها و به دست آوردن فشردگی مؤثرتر در بستر جاده ها، گرم می شود. پس از سرد شدن تا زیر دمای انتقال، سخت می شود. طبق شکل ۱۳-۲-۷ مهندسان ساختمان ترکیب و ساختار محصول نهایی را معین می کنند تا بتوانند نیازهای مختلف بستر جاده ها را برآورده سازند. برای کسب اطلاعات بیشتر می توان به کتابهای مواد ساختمانی بزرگراهها مراجعه کرد.

مثال ۱۳-۲-۱ نمونه ای از ماسه تر را خشک می کنیم تا آب سطحی آن و نه آب جذب شده اش، خشک شود. وزن آن ۸۷۹۱ کیلو گرم است. در این صورت حجم انباشتی ذرات سنگریزه (بدون منفذهایی بین آن) با جانشین سازی آب 3570 cm^3 تعیین شده است. پس از خشک کردن کامل وزن آن ۸۷۷۹ کیلو گرم است.



شکل ۱۳-۲-۷ مغزه‌های سنگ‌فروش آسفالت (۵×). این محصول مانند بتن انباشته شده است؛ ولی آسفالت ویسکوز درست مانند سیلیکات آبدار به عنوان پیوند عمل می‌کند. (الف) مرحله پیوند. ماسه (۳۵ w/o) و آسفالت (۵ w/o)، فواصل بین سنگهای درشت (۶۵ w/o) را پر می‌کنند، تا تکیه‌گاه صلبی روی کلوخه‌هایی که در زیر قرار داده شده‌اند به وجود آید؛ (ب) مرحله تراز کردن. ترکیب آن شبیه به مرحله قبل است. بجز آنکه سنگها ریزترند؛ (ج) مرحله سایشی. با آسفالت بیشتر (۶ w/o)، ماسه بیشتر (۵۵ w/o) و ۴-۵ w/o کانی پرکننده (خاکستر بادی) سطح نفوذناپذیر چقرمه‌ای تشکیل می‌شود که در مقابل سایش حاصل از رفت و آمد مقاوم است.

الف) تخلخل ظاهری آن چقدر است؟

ب) چگالی ظاهری ذرات سنگریزه چقدر است؟

حل: حجم انباشتی = 3570 cm^3 (یا 0.00357 m^3). از آنجا که در منفذهای باز ۱۲۰ کیلوگرم (120 cm^3) آب جذب می‌کند، حجم ظاهری آن برابر است با $3570 - 120 \text{ cm}^3 = 3450 \text{ cm}^3$ (یا 0.00345 m^3)

$$\text{الف) تخلخل ظاهری سنگریزه} = \frac{120 \text{ cm}^3}{3570 \text{ cm}^3}$$

$$= 3.34\%$$

$$\text{ب) چگالی ظاهری سنگریزه} = \frac{8790 \text{ g}}{3250 \text{ cm}^3}$$

$$= 2755 \text{ g/cm}^3 \text{ (یا } 2755 \text{ Mg/m}^3\text{)}$$

توضیح: چگالی انباشتی ذرات سنگریزه را نیز می توان محاسبه کرد.

$$\text{▲} \quad \frac{8790 \text{ g}}{3570 \text{ cm}^3} = 246 \text{ g/cm}^3 \text{ (یا } 246 \text{ Mg/m}^3\text{)}$$

مثال ۱۳-۲-۲ چگالی حقیقی بتن که به آن عامل هواده افزوده شده است برابر 2780 Mg/m^3 است. ولی مغزه خشکی ($152 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$ قطر) از این بتن فقط 2982 kg وزن دارد. همین مغزه وقتی از آب اشباع شود 308 kg وزن دارد.

الف) درصد منفذهای باز و بسته در بتن حاصل چقدر است؟

ب) چگالی انباشتی و ظاهری بتن حاصل چقدر است؟

حل:

$$\text{حجم انباشتی} = \pi (51 \text{ mm})^2 (152 \text{ mm}) \left(\frac{1 \text{ cm}^3}{1000 \text{ mm}^3} \right)$$

$$= 1242 \text{ cm}^3$$

$$\text{حجم حقیقی} = \left[\frac{2982 \text{ g}}{278 \times 10^6 \text{ g/m}^3} \right] (10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)$$

$$= 1065 \text{ cm}^3$$

$$\text{تخلخل کل} = \frac{1242 \text{ cm}^3 - 1065 \text{ cm}^3}{1242 \text{ cm}^3} = 14 \text{ v/o}$$

$$\text{حجم منفذهای باز} = \frac{308 \text{ g} - 2982 \text{ g}}{1 \text{ g H}_2\text{O/cm}^3}$$

$$= 98 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O}$$

$$\text{الف) تخلخل ظاهری (باز)} = \frac{98 \text{ cm}^3}{1242 \text{ cm}^3} = 8 \text{ v/o (یا } 8 \text{ v/o)}$$

منفذهای بسته $147/0 - 87/0 = 67/0$

$$\text{ب) چگالی انباشتی} = \frac{2982 \text{ g}}{1242 \text{ cm}^3} = 2.4 \text{ g/cm}^3$$

$$= 2.4 \text{ Mg/m}^3$$

$$\text{چگالی ظاهری} = \frac{2982 \text{ g}}{1242 - 98 \text{ cm}^3} = 2.6 \text{ g/cm}^3$$

$$\Delta = 2.6 \text{ Mg/m}^3$$

مثال ۱۳-۲-۳ مخلوط واحد بتن شامل 136 kg سنگریزه، 95 kg ماسه، 427 kg سیمان پرتلند، و 225 kg آب، به علاوه $57/0$ هوای عبوری است. برای ساختن دیوار حائل $28.6 \text{ m} \times 1.07 \text{ m} \times 3.05 \text{ m}$ چقدر سیمان لازم است؟

چگالی Mg/m^3 *		
انباشتی*	ظاهری	ماده
1.76	2.60	سنگریزه
1.68	2.65	ماسه
1.50	3.25	سیمان

* بر مبنای دریافت شده (شامل حجم فضاهای بین ذرات است).

يك واحد مخلوط: مبنا

حل:

$$\text{حجم سنگریزه} = \frac{136000 \text{ g}}{2.60 \times 10^6 \text{ g/m}^3} = 0.0523 \text{ m}^3$$

$$\text{حجم ماسه} = \frac{95000 \text{ g}}{2.65 \times 10^6 \text{ g/m}^3} = 0.0358$$

(در فضای بین سنگریزه‌ها)

$$\text{حجم سیمان} = \frac{42700 \text{ g}}{325 \times 10^6 \text{ g/m}^3} = 0.0131$$

(در فضای بین ماسه و سنگریزه)

$$\text{حجم آب} = \frac{22500 \text{ g}}{10^6 \text{ g/m}^3} = 0.0225$$

(در فضای باقیمانده بین اجسام جامد)

$$\text{مجموع حجم سنگریزه، ماسه، سیمان و آب} = 0.124 \text{ m}^3$$

$$\frac{\text{کل m}^3}{\text{مخلوط واحد}} = \frac{0.124 \text{ m}^3}{0.95} = 0.1305 \text{ m}^3$$

$$\text{مخلوطهای واحد} = \frac{933 \text{ m}^3}{0.1305 \text{ m}^3} = 715$$

$$\text{سیمان لازم} = (715)(427 \text{ kg}) = 3050 \text{ kg}$$

مثال ۱۳-۲-۴ مخلوط بتن شامل ۵۸۵ kg ماسه و سنگریزه، ۱۰۰ kg سیمان، و ۵۵ kg آب است. فرض کنید سیمان الف) تماماً تری کلسیم آلومینات، $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ است؛ ب) تماماً تری کلسیم سیلیکات Ca_3SiO_5 است؛ ج) تماماً دی کلسیم سیلیکات Ca_2SiO_4 است. افزایش دما در حین آبدار کردن چقدر است؟ گرمای ویژه متوسط مخلوط بتن $0.8 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ (یا $0.2 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$) است. فرض کنید نیمی از گرما تلف شود.

حل:

مخلوط 715 g سیمان 1 g : مبنا

از داده‌های شکل ۱۳-۲-۵،

الف) $(0.8 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}) \Delta T = (865 \text{ J/g (سیمان)}) (715 \text{ g (سیمان)})$

$$\Delta T = 73^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = \frac{0.8 (500 \text{ J})}{592 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}} = 42^\circ\text{C} \quad \text{ب)}$$

$$\Delta T = \frac{0.8 (260 \text{ J})}{592 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}} = 22^\circ\text{C} \quad \text{ج)}$$

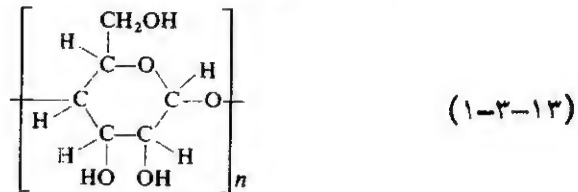
توضیح. $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ و Ca_3SiO_5 نه تنها بیشتر از Ca_2SiO_4 گرما آزاد می‌کنند بلکه در مدت نسبتاً کوتاهی واکنش انجام می‌دهند. بنابراین در مراحل اولیه

خودگیری از ساختمانهای بزرگ کسر کوچکتري از گرما خارج می شود. افزایش دما ممکن است بحرانی شود مگر اینکه فقط مقدار کمی $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ و Ca_3SiO_5 در سیمان موجود باشد.

□ ۱۳-۳ چوب

اگرچه ساختار چوب پیچیده است ولی ماده ای به حد کافی آشناست به طوری که خواص و ساختار آن را می توان کاملاً تشخیص داد. ماکروساختار آن در دانه های آشکار است. میکروساختار آن منشأ بیولوژیکی دارد؛ و کوئورددیناسیونهای اتمی آن مولکولی اند. البته چوب ماده مهندسی بسیار مهمی است. نسبت استحکام به وزن آن زیاد است. به آسانی حتی در هنگام کار شکل می گیرد. و بالاخره در این روزهای کمبود مواد خام می تواند جانشین مواد دیگر شود. از خواص جهت دارش آگاهی داریم، همیشه در هنگام استفاده از آن باید این خواص را در نظر گرفت. برای درک بیشتر چوب، ساختار را بررسی می کنیم.

چوب ماده چندسازه پلی مری طبیعی است. مولکولهای پلی مری اصلی آن سلولزی اند.

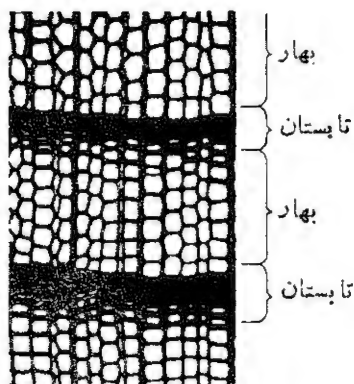


از آنجا که سلولز یک آرایشی است و شاخه های جانبی ندارد، اندکی بلورین می شود. علاوه بر ترکیب ۵۰٪ سلولزی آن، چوب ۱۰٪ تا ۳۵٪ لیگنین دارد که پلی مری سه بعدی با اتصال متقاطع و پیچیده تر است.

از مولکولهای پلی مری بزرگتر، متداولترین ساختار چوب، سلولهای بیولوژیکی اند که در بین آنها آوندهای ناقص از همه شناخته شده ترند. اینها سلولهای دوکی شکل سوراخداري اند که در جهت طولی چوب امتداد دارند. آشکارترین واحد ساختاری آن دانه چوب است که از لایه های بهاری و تابستانی ساخته شده است. سلولهای بیولوژیکی چوب بهاری بزرگتر است و نسبت به چوب تابستانی دیواره های نازکتری دارد (شکل ۱۳-۳-۱). از این حیث سلولهای بیولوژیکی نسبت به سلولهای واحد بلورها از نظر ساختار بسیار متنوعترند.

البته، توضیح فوق در مورد چوب بسیار ساده شده است* ولی علت چندسویی در

* انواع مختلف ترکیبات شیمیایی جزئی چوب و شعاعهای آوندی که ردیفهایی از تک سلولهای هم جهت اند و از مرکز درخت در جهت شعاع منشعب می شوند، به حساب نیامده اند. این عوامل در حین تغییر شکل اهمیت پیدا می کنند.



شکل ۱۳-۳-۱ میکروساختار چوب.
واحدهای ساختاری، سلولهای بیولوژیکی اند.
سلولهایی که با رشد زود (بهاری) تشکیل
می شوند. از آنهایی که با رشد دیر (تابستانی)
تشکیل می شوند بزرگترند ولی دیواره های
نازکتری دارند. سلولز (فرمول ۱۳-۳-۱)
جزء مولکولی اصلی آن است.

خواص را که از ویژگیهای مهم چوب است، نشان می دهد.
در موادی که ساختار ساده دارند چگالی، خاصیتی مستقل از ساختار است. این امر
در مورد ماده پیچیده ای مثل چوب صادق نیست. در درجه اول مقدار چوب بهاری و تابستانی
از نوعی به نوع دیگر تفاوت دارد. در درجه دوم نسبت سلولز به لیگنین تغییر می کند
(به ترتیب $\rho \approx 1.55 \text{ g/cm}^3$ و 1.35 g/cm^3) در نتیجه این دو عامل، چگالی
می تواند گستره ای از تقریباً 1.15 g/cm^3 برای بسالزا تا 1.3 g/cm^3 برای
لیگنم دیتای* پرچگالی، داشته باشد. علاوه بر عوامل فوق چوب نمگیر است، زیرا رطوبت
را به صورت تابعی از رطوبت هوای محیط اطراف جذب می کند. به همین علت بیشتر
چوبها هنگامی که خیس اند، افزایش ویژه ای در چگالی نشان می دهند.

چند سویی. تعجبی ندارد اگر بگویم تغییرات ابعادی حاصل از تغییر در دما، رطوبت،
و بارگذاری مکانیکی در چوب، چندسو است. متخصصین چوب متذکر می شوند که
انبساط گرمایی در جهت مماسی، α_t ، (شکل ۱۳-۳-۲) و شعاعی، α_r ، بیشتر از جهت طولی،
 α_l ، است انبساط گرمایی در جهت طولی تقریباً مستقل از چگالی است، در حالی که در دو جهت
دیگر به چگالی ρ (بر حسب g/cm^3) بستگی دارد. بین -50°C و $+55^\circ \text{C}$

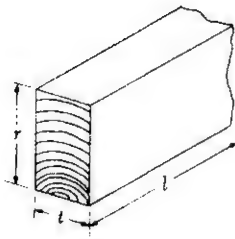
$$\alpha_t \approx [6\rho + 3] \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$$

$$\alpha_r \approx [6\rho + 2] \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$$

$$\alpha_l \approx 0.4 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$$

پس روابط فوق حاکی از آن است که انبساط گرمایی عرضی بیش از ده برابر انبساط طولی
است.

* نوعی درخت گرمسیری صمغ دار در امریکا که چوب سختی دارد. م.



شکل ۱۳-۳-۲ ماکروساختار چوب. خواص آن چند سو است زیرا رشد آن لایه‌هایی از سلول با خواص مختلف به وجود می‌آورد. استحکام، مسدول کشسانی و ضرایب انبساط همه در جهت‌های مختلف، متفاوت اند.

مثلاً، مقادیر طولی مدول یسانگت اگر در کشش اندازه‌گیری شود بین 7000 MPa تا 14000 MPa است. مقادیر مماسی معمولاً بین 400 MPa و 700 MPa است. در حالی که مقادیر شعاعی معمولاً در گستره 500 MPa تا 1000 MPa قرار دارد. انتظار می‌رود مقدار طولی بیشترین مقدار باشد. هرچند می‌توان پیش‌بینی کرد که مدولهای مماسی نیز از شعاعی بیشترند. ولی در شکل ۱۳-۳-۱ شعاعهای آوندی را که در پانوشت مربوط به آن شرح دادیم به حساب نیاورده‌ایم. این پدیده موجب به وجود آمدن صلابت اضافی در جهت شعاعی می‌شود.

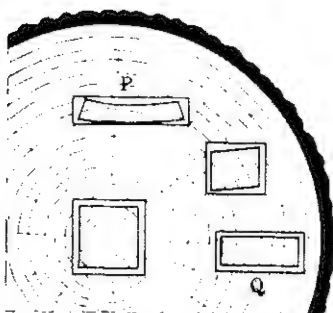
انقباض نیز چند سواست. تغییرات طولی قابل اغماض اند، ولی انقباض مماسی بسیار بالاست ($1/25$ تا $1/30$ در هر 1% رطوبت برای درخت صنوبر داگلاس)*. انقباض شعاعی در حید متوسط است (در هر 1% ، تقریباً $1/150$ رطوبت برای همین چوب). علت این امر آثار کرنشی مجدد شعاعهای آوندی است. آثار انقباض در شکل ۱۳-۳-۳ خلاصه شده است. نتایج اعوجاج یا قاب برداشتن کاملاً آشکار است.

استحکام کششی طولی R_t بیش از بیست برابر استحکام کششی شعاعی R_r است. زیرا هر شکستی که رخ می‌دهد باید در عرض سلولهای آوند ناقص صورت گیرد. افزایش چگالی (برای رطوبت معین)، افزایش ضخامت دیواره‌های سلولها و بنابراین افزایش نسبی در استحکام طولی را منعکس می‌کند. استحکام عرضی نیز مطابق آن زیاد می‌شود (باز هم برای رطوبت معین)، زیرا هر چه چگالی چوب بیشتر باشد، فرصت کمتری برای شکست در جهت موازی با سلولهای خالی آوند ناقص دارد.

بجز در مواردی که در طراحی استحکام طولی مدنظر است، چندسویی چوب نامطلوب است. بنابراین برای بهبود ساختار آن کارهای بسیاری انجام شده است مثلاً (۱) تخته چندلای که در آن از استحکام طولی در دو جهت استفاده شده است؛ (۲) فیبر که در آن بافتهای منفرد چوب جدا شده‌اند و به صورت تصادفی در صفحه مسطحی در کنار هم قرار گرفته‌اند؛ (۳) نئوپان که در آن پوسته‌های نازک یسان ذات چوب به صورت تصادفی روی صفحه‌ای

* نوعی درخت بلند همیشه‌سبز از خانواده کاجها که در نواحی غربی امریکای شمالی یافت می‌شود. — م.

** بر اساس ابعاد چوب تر تعیین شده است.



شکل ۱۳-۳-۳ انقباض چوب. از آنجا که ساختار چندسوس است، انقباض با جهتگیری تغییر می‌کند. اگر چوب قبل از آنکه کاملاً خشک شود بریده شود، ممکن است تاب بردارد. (انقباض در این شکل اغراق آمیز است.)
 $Q =$ به‌صورتی که طول در جهت شعاعی باشد
 $P =$ به‌صورتی که ضخامت در جهت شعاعی باشد آره شده است.

کنار هم قرار می‌گیرند و با چسب به یکدیگر چسبانده می‌شوند؛ و (۴) کاغذ که در آن رشته‌های از هم جدا شده چوب (چوب خمیری) به‌صورت تصادفی روی ورق‌بی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و با پیوندهای هیدروژنی به یکدیگر متصل می‌شوند؛ (۵) بالاخره از چوب (و از رشته‌های پنبه) می‌توان سلولز استخراج کرد و از آن به‌عنوان ماده خام بعضی از محصولات پلی‌مری مثل سلولز استات (ابریشم مصنوعی و غیره) استفاده کرد.

مثال ۱۳-۳-۱ در چوبی صلبی از چسباندن لپه‌های تخته‌هایی که طول آنها در جهت شعاعی است و از چوب صنوبر داگلاس ساخته شده است. یعنی عرض تخته در جهت شعاعی و ضخامت آن در جهت مماسی (و البته طول آن در جهت طولی چوب) است، ابتدا در اواخر پاییز وقتی که رطوبت چوب ۹ درصد بوده است در ابعاد 761 mm در 2035 mm بریده شده است (تا برای ورودی $2050 \times 765 \text{ mm}$ مناسب باشد). آیا وقتی که میزان رطوبت به ۱۴ درصد برسد درخواهد «چسبید»؟

حل:

$$\text{تغییر شعاعی} = 0.0015 / \% \times (14 - 9) = +0.0075$$

$$\Delta L = (761 \text{ mm})(+0.0075) = +5.7 \text{ mm}$$

مناسب نخواهد بود، زیرا $761 + 5.7 \text{ mm}$ از 765 mm بیشتر است. تغییر طول قابل اغماض است.

توضیح. طرحی پیشنهاد کنید که این مشکل را کمینه کند. ▲

مثال ۱۳-۳-۲ تخته‌ای از چوب صنوبر داگلاس داریم که پهنای آن در جهت مماسی است. و زمانی که رطوبت از ۵ به ۱۰ درصد افزایش می‌یابد، پهنای این تخته نباید افزایش یابد. چه فشاری به موازات دانه‌ها به وجود می‌آید؟

حل: اگر انبساط مجاز بود

$$\frac{\Delta L}{L} = 0.0025 / \% \times (\%10 - \%5) = +0.0125$$

فرض می‌کنیم $E = 550 \text{ MPa}$ یعنی متوسط مقدار آنچه که در متن برای مدول مماسی ذکر شده است. پس فشار (—) چوب را به ابعاد اولیه آن برمی‌گردانند.

$$s = (-0.0125)(550 \text{ MPa})$$

▲ فشاری $= 7 \text{ MPa}$

مثال ۱۳-۳-۳ جذب آب از رطوبت هوا به داخل چوب ابتدا در میان رشته‌های چوب انجام می‌شود (ونه در داخل منفذها). نقطه اشباع رشته‌ها برای بیشتر چوبها $30 \sim w/o$ (از چوب خشک شده در کوره) است. افزایش چگالی درخت‌غوشه یا غان (با چگالی چوب خشک شده در کوره $= 0.56 \text{ g/cm}^3$) وقتی که رطوبت از 10% تا 20% تغییر می‌کند چقدر است؟ (فرض کنید انقباض آن برابر انقباض چوب صنوبر داگلاس باشد).

حل: چوب خشک 1 cm^3 : مبنا

با 10% رطوبت	با 20% رطوبت
$l = 1.000 \text{ cm}$	$l = 1.000 \text{ cm}$
$r = 1.0000 [1 + (0.0015 / \%)(\%10)]$	$r = 1.0030 \text{ cm}$
$= 1.0015 \text{ cm}$	
$l = 1.0000 [1 + (0.0025 / \%)(\%10)]$	$l = 1.0050 \text{ cm}$
$= 1.0025 \text{ cm}$	
حجم $= 1.04 \text{ cm}^3$	$V = 1.08 \text{ cm}^3$
چگالی $= \frac{(0.56 \text{ g})(1.10)}{1.04 \text{ cm}^3}$	$\rho = \frac{(0.56 \text{ g})(1.20)}{1.08 \text{ cm}^3}$
$= 0.59 \text{ g/cm}^3$	$= 0.62 \text{ g/cm}^3$

▲ $\Delta \rho = \frac{0.62 \text{ g/cm}^3 - 0.59 \text{ g/cm}^3}{0.59 \text{ g/cm}^3} = 5\%$ افزایش

۱۳-۴ مواد چندسازه

قبلا بعضی از مواد چندسازه را (آنهايي را که درمقیاس میکروسکوپی تقویت شده اند) شرح دادیم. بینیت، مارتزیت بازبخت شده، و آلیاژهای رسوب سختی (پیرسختی) شده با توزیع ذرات ریز فاز سخت تر استحکام می یابند. مثلاً استحکام کششی $(\alpha + \bar{C})$ در مارتزیت بازبخت شده می تواند بیش از 1400 MPa باشد. درحالی که استحکام کششی فریت، α ، به تنهایی کمتر از ۲۰٪ این مقدار است. افزایش استحکام به این علت است که فاز تغییر شکل پذیر نمی تواند مستقل از فاز صلب کرنش بپذیرد.

مواد چندسازه تقویت شده درمقیاس ماکروسکوپی را بدخوبی می شناسیم. نمونه هایی از آن شامل بتن مسلح و پلاستیکهای تقویت شده با رشته ها (FRP) است. چوب ماهیگیری «شیشه ای» را در نظر بگیرید. این وسیله از یک دسته رشته های شیشه ای موازی که توسط رزین پلی مری به هم چسبانده شده اند تشکیل شده است (یا برعکس میله ای پلاستیکی است که در جهت طولی توسط رشته های شیشه ای تقویت شده است). اگر این ماده چندسازه تحت کشش قرار گیرد، پلاستیک و شیشه باید به طور هماهنگ تغییر شکل دهند، با وجود اینکه هر دو جزء ممکن است مدول کشسانی کاملاً متفاوتی داشته باشند ($E_{\text{پلاستیک}}/E_{\text{شیشه}} > 10$) یا استحکام یکا یک آنها به طور محسوسی تفاوت داشته باشد ($E_{\text{پلاستیک}}/E_{\text{شیشه}} > 20$). در اینجا پلاستیک تقویت شده با رشته ها را، که در بالا ذکر شد، وقتی تحت کشش قرار دارد تحلیل می کنیم. اگر رشته ها پیوسته باشند $E_{\text{پلاستیک}} = e$ ، زیرا هر دو به یکدیگر چسبانده شده اند. به همین ترتیب درمی یابیم که $E_{\text{پلاستیک}} \neq e$ زیرا این دو مدول کشسانی، E ، متفاوتی دارند

$$\frac{s_1}{E_1} = e_1 = e_2 = \frac{s_2}{E_2} \quad (13-4-1)$$

در اینجا زیر نویسها دو جزء را نشان می دهند. بنابراین

$$\frac{s_1}{E_1} = \frac{E_1}{E_2} \quad (13-4-2)$$

قبلا در مبحث چندسویی کشسان (شکل ۳-۴-۶) به این مطلب برخورد کرده ایم. این امر ما را به قاعده اول تقویت هدایت می کند. فاز تقویت کننده باید فازی باشد که مدول بیشتری دارد تا بتواند بار اضافه را تحمل کند.

می توانیم قواعد اختلاط را نه تنها برای چگالی (رابطه ۱۰-۲-۱)، گرمای ویژه (رابطه ۱۰-۴-۲)، و رسانندگی (معادله های ۱۰-۴-۳ و ۱۰-۴-۴) بلکه برای چندین خاصیت مکانیکی مثل مدول یانگ نیز بنویسیم. بار دیگر نظر شما را به پلاستیکهای تقویت شده با رشته ها که در پاراگراف قبل آمده جلب می کنیم. اگر f_1 و f_2 نسبت حجم دو جزء را نشان دهند، و رابطه ۱۳-۴-۱ را به کار ببریم، از آنجا که $e_1 = e_2$ ، پس

$$\frac{F_1/f_1 A}{E_1} = \frac{F/A}{E} = \frac{F_2/f_2 A}{E_2} \quad * (3-4-13)$$

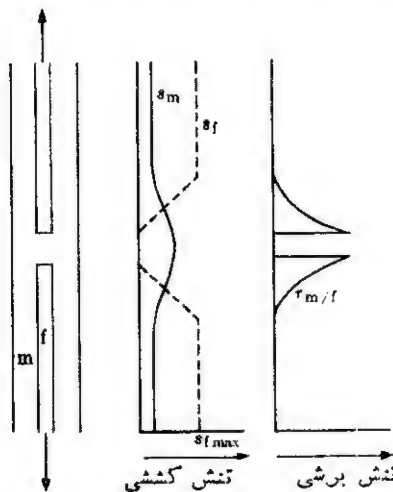
در اینجا E مدول ماده چندانسازه است. همچنین، از آنجا که بار کل F مساوی مجموع بارهاست،

$$F = \frac{f_1 E_1 F}{E} + \frac{f_2 E_2 F}{E}$$

$$E = f_1 E_1 + f_2 E_2 \quad * (4-4-13)$$

□ **تنشهای بین سطحی.** هر مهندس عمران می داند که تنشهای برشی در سطح بین میلۀ تقویت کننده و بتن ظاهر می شوند. به همین دلیل میلۀهای «تغییر شکل یافته» ای با سطح کنگره ای (ASTM A 305) به کار می برند. تنشهای برشی مشابه آن در بین رشته های تقویت کننده و زمینۀ پلاستیکی اطراف آن دیده می شوند. ولی در اینجا به جای پیوندهای مکانیکی، پیوندهای شیمیایی تنشهای برشی را تحمل می کنند.

اگر تقویت کننده یکپارچه نباشد تنشهای برشی بین سطحی اهمیت خاصی می یابند. این مطلب را شکل ۱۳-۴-۱ نشان می دهد. در این شکل، $\sigma_{f \max}$ ، تنشی را نشان می دهد که رشته ها در صورت نبودن اثر انتهایی (بینهایت بودن طول) تحمل می کنند. این امر به محاسبات مثال ۱۳-۴-۱ که به طور خلاصه در زیر آمده است، مربوط می شود و به کسر حجم تقویت کننده و همچنین به مدول یا ننگ دوماده بستگی دارد. ولی اگر رشته بریده شود تنش رشته



شکل ۱۳-۴-۱ توزیع تنش (در مقطعی از رشته های تقویت شده) تنش رشته، σ_f ، از مقدار بیشینه خود به صفر افت می کند. بار باید توسط تنشهای برشی، $\tau_{m/f}$ ، از میان مرز بین سطحی عبور کند و از رشته به زمینۀ برسد. زمینۀ در اطراف محل شکست باید تنش بیشتری، σ_m ، را تحمل کند.

* در این محاسبات فرض شده است که نسبت های پواسون ν برای دو جزء مساوی است.

در آن نقطه به صفر تنزل می‌کند. در این صورت بار باید توسط تنشهای برشی به زمینه منتقل شود. در این انتقال بار دو مسئله اهمیت دارد.

۱. پیوند بین دو ماده باید به حد کافی قوی باشد تا بتواند تنشهای برشی را تحمل کند.
۲. اگر تقویت کننده یکپارچه باشد یا حداقل طول ظاهری (l/d) آن زیاد باشد، مؤثرتر است. قطع شدن آن در یک محل، بار را به زمینه ضعیفتر منتقل می‌کند. در نتیجه زمینه تغییر شکل پذیر در اینجا مزیتی دارد، زیرا بار می‌تواند در سطح بزرگتری توزیع شود و تنشهای بیشینه آن کمتر شود. (البته در این مورد حادی وجود دارد، زیرا زمینه فوق العاده ضعیف کاملاً می‌شکند.)

مثال ۱۳-۴-۱ میلۀ پلی وینیلیدن کلرید که با شیشه تقویت شده است حاوی ۲۵ W/O رشته‌های شیشه‌ای بوروسیلیکات است. تمام رشته‌ها در امتداد طول قرار گرفته‌اند. چه کسری از بار توسط شیشه تحمل می‌شود؟

حل: (داده‌ها با استفاده از پیوست (ج). g/cm^3 را به کار برید) g : ۱ مینا

$$v/o = \frac{(0.25 \text{ g}) / (2.2 \text{ g/cm}^3)}{(0.25/2.2)_{\text{پی-وی-سی}} + (0.75)/(1.7)} \\ = 19 \text{ v/o} (= 19 \text{ درصد مساحت})$$

$$\frac{\text{بار شیشه}}{\text{شیشه } E \text{ شیشه } A} = e_{\text{شیشه}} = \text{پی-وی-سی} = \frac{\text{بار پی-وی-سی}}{E_{\text{پی-وی-سی}} A_{\text{پی-وی-سی}}}$$

$$\Delta \frac{\text{بار شیشه}}{\text{بار پی-وی-سی}} = \frac{(0.19)(70000 \text{ MPa})}{(0.81)(350 \text{ MPa})} \approx \frac{98\%}{2\%}$$

□ مثال ۱۳-۴-۲ قاعده اختلاطی برای مدولهای یا ننگ ماده لایه لایه بنویسید. در صورتی که تنش عمود بر (\perp) «دانه‌های» ماده لایه لایه اعمال شود.

حل: با باردهی عرضی $s_1 = s = s_2$

$$\bar{E}_{\perp} = \frac{s_{\perp}}{e} = \frac{s}{e_1 f_1 + e_2 f_2}$$

$$= \frac{1}{f_1/E_1 + f_2/E_2}$$

$$\frac{1}{\bar{E}_{\perp}} = \frac{f_1}{E_1} + \frac{f_2}{E_2}$$

توضیح. برای به دست آوردن این رابطه و رابطه (۱۳-۴-۴) فرض شده است که نسبت پواسون برای دو جزء تقریباً یکسان باشد و بنا بر این به علت اختلاف در کرنشهای جانبی، تنشهای فرعی وجود نداشته باشند.

مثال ۱۳-۴-۳ يك ورق آهنی به ضخامت 25 mm که در اجاق خانگی به کار می رود از هر دو طرف با لعاب شیشه ای پوشانده شده است. فرایند نهایی در بالای نقطه کرنش، 500°C (930°F)، صورت می گیرد تا پوشش 5 mm به وجود آید. شیشه مدول یانگی مساوی 70000 MPa و انبساط گرمایی $10^{-6}/^\circ\text{C}$ دارد.

الف) تنشهای موجود در شیشه در 20°C چیست؟

ب) در 200°C چگونه؟ (فرض کنید کرنش پلاستیکی وجود ندارد).

حل: از آنجا که $\Delta l/l = \text{انبساط گرمایی} + \text{کرنش کشان}$ ، و در این حالت $(\Delta l/l)_{\text{Fe}} = (\Delta l/l)_{\text{شیشه}}$ ، می توان نوشت

$$\alpha_{\text{شیشه}} \Delta T + \frac{s_{\text{شیشه}}}{E_{\text{شیشه}}} = \alpha_{\text{Fe}} \Delta T + \frac{s_{\text{Fe}}}{E_{\text{Fe}}}$$

الف) با استفاده از داده های بالا و پیوست (ج)

$$\frac{s_{\text{Fe}}}{70000 \text{ MPa}} - \frac{s_{\text{شیشه}}}{205000 \text{ MPa}} = (10^{-6}/^\circ\text{C})(-480^\circ\text{C})$$

ولی $s_{\text{شیشه}} = -F_{\text{شیشه}}$ و $F_{\text{Fe}} = 25 \text{ A}$ ، در نتیجه $s_{\text{Fe}} = 25 \text{ A}$

$$s_{\text{Fe}} \left[-\frac{1}{205000} + \frac{25}{70000} \right] = 0.0018$$

با حل این این معادله داریم

$$s_{\text{Fe}} = +22 \text{ MPa} \quad (\text{کش:} +)$$

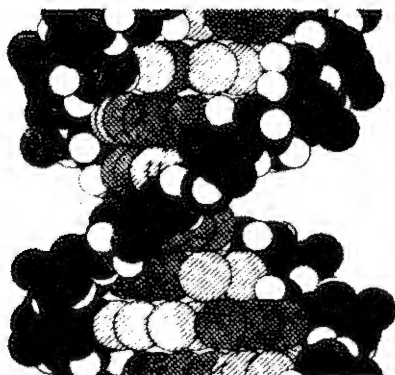
$$s_{\text{شیشه}} = -110 \text{ MPa} \quad (\text{فشار:} -)$$

ب) با محاسبات مشابه برای 500°C - 200°C

$$s_{\text{شیشه}} = -69 \text{ MPa} \quad \text{و} \quad s_{\text{Fe}} = +275 \text{ MPa}$$

توضیح. فرض کردیم کرنش در يك جهت باشد. در حقیقت، کرنش صفحه ای (یعنی دوبعدی) وجود دارد. در صورت اعمال تصحیحات لازم تنش بیشتری با ضریب $(1-\nu)^{-1}$ به دست می آید، که در آن، ν نسبت پواسون است (بخش ۶-۳).

مرور و بررسی مطالب

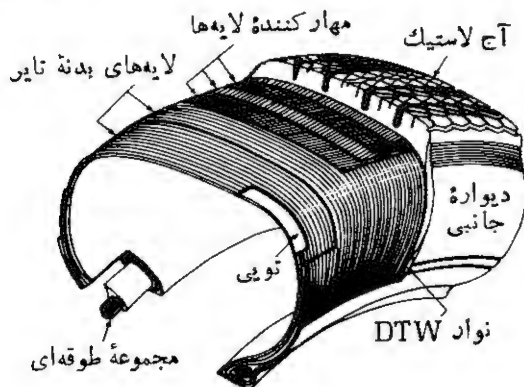


شکل ۱۳-۵-۱ ساختار زیر میکروسکوپی (مولکول DNA: مدل واتسون-کریک). اگر توسط آنزیمهای دیگر حلقه‌ها باز شوند، هریک از مولکولهای آن و مارپیچ دو تایی جدید ساختار مشابهی خواهند داشت.

نتیجه

در این فصل که آخرین فصل است چهار ماده به عنوان نمونه انتخاب شده است. این چهار ماده کاربرد وسیعی دارند و بنابراین همگی با آنها آشنایی داریم. مسلماً هیچیک از اینها، ماده ساده‌ای نیستند. ولی هریک از آنها خواصی دارند که از ساختار داخلی آنها ناشی می‌شود. به‌طور خلاصه این مفهوم علم مواد و مهندسی آن است.

این مفهوم را می‌توان برای تمام انواع مواد گسترش داد، چه زیر میکروسکوپی باشند مثل مولکول DNA بامارپیچ دوتایی (شکل ۱۳-۵-۱) و چه ماکروسکوپی باشند مثل لاستیک ماشین که دارای آج، سیم طوقه، لایه‌ها، لاستیکهای آستری و غیره است (شکل ۱۳-۵-۲). مهندسی که ساختار را تحلیل می‌کند و یا ماده‌ای را برای کاربرد معینی طراحی، یا برای تکمیل طرحی انتخاب می‌کند باید به‌طور مداوم از این مفاهیم استفاده کند.



شکل ۱۳-۵-۲ ساختار ماکروسکوپی (تایر ماشین) ساختار چندسازه آن رفتار محصول را در حین کار کنترل می‌کند.

سؤالات تشریحی

۱. چرا چدن یکی از ارزانه‌ترین مواد فلزی است؟ چند دلیل ذکر کنید.
۲. تفاوت بین فرایندهایی را که منجر به، به وجود آمدن چدن، چدن کروی، و چکش‌خوار می‌شوند، شرح دهید.
۳. تفاوت بین فرایندهایی را که منجر به، به وجود آمدن چدن فریتی، پسریتی و بینیتی چکش‌خوار می‌شوند، شرح دهید.
۴. آیا چدن پسریتی را می‌توان بدون ذوب مجدد فلز به چدن فریتی تبدیل کرد؟ اگر چنین است، چگونه؟ آیا چدن فریتی می‌تواند بدون ذوب مجدد فلز به چدن پسریتی تبدیل شود؟ اگر چنین است، چگونه؟
۵. آیا چدن خاکستری را می‌توان بدون ذوب کردن مجدد فلز به چدن چکش‌خوار تبدیل کرد؟ اگر چنین است، چگونه؟ آیا چدن چکش‌خوار را می‌توان بدون ذوب مجدد فلز به چدن سفید تبدیل کرد؟ چرا؟
۶. براساس میکروساختار، انعطاف پذیری چدن فریتی خاکستری، چدن فریتی چکش‌خوار، فولاد فریتی، چدن فریتی کروی را باهم مقایسه کنید. پاسخ خود را تشریح کنید.
۷. شرح دهید که چرا ساختن قطعات ریختگی بزرگ از چدن چکش‌خوار ممکن نیست.
۸. فولادهایی که سیلیسیم دارند برای ساخت قطعاتی که به مدت زیاد در دمای بالانگه‌داشته می‌شوند مناسب نیستند. دلیل آن را بنویسید.
۹. چدن‌ها معمولاً به جای جوشکاری، لحیمکاری سخت می‌شوند. آلیاژ لحیمکاری سخت آن معمولاً فلز پرکننده‌ای از آلیاژ مس است که قطعات چدن را به هم متصل می‌کند و لسی آنها را ذوب نمی‌کند. چرا مانند فولادها آن را جوشکاری نمی‌کنیم؟
۱۰. فرض کنید ماسه از ذرات کروی تشکیل شده است. ذرات روی سرندهای تایلر براساس سطح مقطع بیشینه خود چگونه مقایسه می‌شوند؟ براساس حجم چگونه؟
۱۱. فرق بین چگالیهای ظاهری، انباشتی و حقیقی را شرح دهید؛ تفاوت بین تخلخل کل و تخلخل ظاهری را بنویسید.
۱۲. اگر سایر عوامل مانند شکل یکسان باشند، تخلخل کل ماسه ریزدانه‌ای می‌تواند با تخلخل کل ماسه درشت دانه‌ای برابر باشد. استثنای این امر کلی وقتی است که اندازه دانه به اندازه مخزن آن نزدیک شود. در این باره شرح دهید.
۱۳. برای آبدار کردن سیمان پرتلند و در نتیجه استحکام بخشیدن به آن، آب لازم است. ولی آب اضافی بتن را ضعیف می‌کند. در این باره شرح دهید.
۱۴. بسیاری فکر می‌کنند بتن هنگامی که سخت می‌شود، خشک می‌شود. اگر این طور باشد، چگونه پایه بل در زیر آب جاری، سخت می‌شود؟
۱۵. ترکیب، ساختار و ویژگیهای ملاط آجر دیوار و بتن را باهم مقایسه کنید.
۱۶. برای صاف کردن سطح حیاطی بتنی بنای غیر حرفه‌ای معمولاً سطح بتن خیس را ماله

- می کشد. این کار چگونه ساختار و خواص بتن را تغییر می دهد؟ برای برطرف کردن نسبی این آثار چه باید کرد؟
۱۷. چرا بنا گاهی قبل از پخش کردن ملات با آب به آجر نم می زنند؟
۱۸. بلوکهای بتنی گاهی از کلوخه های سبک وزن ساخته می شوند. چگونگی ساخت این کلوخه های سبک وزن را حدس بزنید. کدامیک از خواص این بلوکها موجب می شود که استفاده از آنها مقرون به صرفه باشد.
۱۹. چوب فشرده تر در مقایسه با چوب سبکتر، در هوای مرطوب، رطوبت بیشتری جذب می کند. چرا؟
۲۰. در عرضهای جغرافیایی کم بهار و تابستان وجود ندارد. دانه های چوب این نواحی چگونه اند؟ (به شکل ۱۳-۳-۱ رجوع کنید).
۲۱. علت تحذب تابدار تارهای برش بالایی چوب در شکل ۱۳-۳-۳ چیست؟
۲۲. چرا انقباض طولی چوب در مقایسه با انقباض آن در سایر جهات قابل اغماض است؟
۲۳. چوبهای نرم مثل چوب کاج قبل از بریده شدن پخته می شوند، چرا؟
۲۴. به دایره المعارف رجوع کنید و تفاوت بین چوب «نرم» و «سخت» را بنویسید.
۲۵. فرقی بین تخته ساخته شده از ذرات را با تخته ساخته شده از رشته ها بنویسید. تفاوتیای پیش بینی شده در خواص آنها کدام اند؟
۲۶. تخته ای که ضخامت آن در جهت شعاعی است بیشتر از تخته ای که طول آن در جهت شعاعی است در معرض تاب برداشتن است. چرا؟
۲۷. در حوزه کار مهندسی خود، کاربرد از مواد را انتخاب کنید. چه مراحلی باید طی شوند تا ساختار اولیه و خواص آن مطمئناً صحیح باشند؟ آیا شرایط کار روی ساختار (و بنابراین روی خواص) اثر می گذارد؟ انتخاب خود را به صورت گزارشی در کلاس مطرح کنید.

مسائل

- ۱-۱-۱۳ تحلیل میکروسکوپی چدن خاکستری ۱۲۷/۵ گرافیت و ۸۸۷/۵ فریت را نشان می دهد. میزان کربن آن را برآورد کنید.
- جواب: $C \ 3.7\%$ ، و $(Fe+Si) \ 96.3\%$
- ۲-۱-۱۳ چگالی چدن خاکستری فریتی ($C \ 3.5\%$) را برآورد کنید.
- ۳-۱-۱۳ چدن سفیدی حاوی ۵۵٪ سیلیسیم و ۳٪ کربن است. الف) در صورتی که فلز در $800^{\circ}C$ چکش خوار شده باشد مقدار تقریبی کربن در ۷ چقدر است؟ ب) در آن دما چه مقدار گرافیت تشکیل خواهد شد؟
- جواب: الف) تقریباً 0.95% ب) تقریباً ۲٪ گرافیت

۱۳-۱-۴ چگالی آهن چکش خوار پرلینی موجود در مسئله ۱۳-۱-۳ را برآورد کنید. (داده‌های لازم را از مثال ۱۳-۱-۳ به دست آورید.)

۱۳-۱-۵ عملیات گرمایی لازم برای ایجاد چدن چکش خوار بینیتی کدام‌اند؟ دلیلی برای انتخاب خود ذکر کنید.

۱۳-۱-۶ عملیات گرمایی لازم برای ایجاد چدن چکش خوار پرلینی کدام‌اند؟ دلیلی برای انتخاب خود ذکر کنید.

۱۳-۲-۱ نمونه‌ای از بازالیت خرد شده پس از آنکه کاملاً خشک شد، 482 g وزن دارد. وقتی آن را در استوانه درجه‌بندی شده بزرگی می‌ریزم سطح آب آن از 452 cm^3 به 630 cm^3 می‌رسد. پس از آنکه آب را از استوانه بیرون ریختیم، درحالی‌که هنوز آب سطحی باقی مانده است، نمونه 487 g وزن دارد. الف) حجم ظاهری آن چقدر است؟ حجم کل ذرات چقدر است؟ ب) تخلخل بار ذرات خرد شده چقدر است؟ چگالی ظاهری را نیز به دست آورید.

جواب: الف) $(178\text{ cm}^3, 182\text{ cm}^3)$ ب) $277/0$

ج) $2765\text{ g/cm}^3 (= 2765\text{ Mg/m}^3)$

۱۳-۲-۲ به منظور تعیین حجم یک بلوک ساختمانی بتنی با شکل نامنظم، سه اندازه‌گیری به عمل آمده است. وزن (خشک): 1757 kg ؛ وزن (اشباع شده با آب) $= 18/93\text{ kg}$ ؛ وزن (معلق در آب) $= 10543\text{ kg}$. الف) حجم انباشتی بلوک چقدر است؟ ب) حجم ظاهری بلوک چقدر است؟

۱۳-۲-۳ چگالی انباشتی سنگ آهک خرد شده‌ای پس از بسار زدن در کامیون 1827 Mg/m^3 است. در صورتی که چگالی حقیقی سنگ آهک 277 Mg/m^3 باشد تخلخل کل آن چقدر است؟

جواب: $327/0$

۱۳-۲-۴ کامیون حمل مصالح ساختمانی کوچکی هنگامی که پر باشد 3500 kg سنگریزه حمل می‌کند (ظرفیت $= 2\text{ m}^3$). چگالی ظاهری این سنگریزه توسط قرار دادن 5 kg از آن در بشری به حجم 125 m^3 در اندازه‌گیری شده است. آب و سنگریزه دارای وزن خالص 1596 kg هستند. الف) چگالی ظاهری سنگریزه چقدر است؟ ب) چه حجمی ماسه باید به داخل این کامیون سنگریزه ریخته شود تا بیشترین ضریب فشردگی به دست آید؟

۱۳-۲-۵ مخلوطی از بتن شامل حجمهای زیر است (بر مبنای دریافت شده): سیمان، ۱؛ ماسه، ۲٫۲۵؛ شن، ۲٫۸۵؛ آب، ۰٫۰۸ با استفاده از داده‌های مثال ۱۳-۲-۳، حجم نهایی این مخلوط را محاسبه کنید.

جواب: ۴۶ (می‌تواند cm^3 یا ft^3 باشد).

۱۳-۲-۶ مخلوط واحدی از بتن حاوی 427 kg سیمان، 125 kg ماسه، 160 kg سنگریزه، و 21 kg آب است. با استفاده از داده‌های مثال ۱۳-۲-۳، تعداد مخلوط‌های واحد لازم برای راهی با حجم 20 m^3 را حساب کنید.

۱۳-۲-۷ بر اساس وزن خشک، مخلوط واحدی از بتن حاوی 277 سنگریزه، 22 ماسه و 1 سیمان، به علاوه 50 آب است. سنگریزه همان است که در مثال ۱۳-۲-۱ آمده بود، ولی خشک نیست. در عوض ذرات کلوخه با آب اشباع شده است. (شکافها و منفذهای باز پر شده‌اند). مخلوط واحد را چگونه باید تنظیم کرد؟

جواب: 46 ره واحد H_2O ، به جای 50 ره

۱۳-۲-۸ مخلوط موجود در مسئله ۱۳-۲-۵ با مخلوط سیمان، 1 ماسه، 2 سنگریزه، و آب 7 ره عوض شده است. به علاوه، $47/0$ هوا به آن داده شده است. حجم مخلوط نهایی چقدر است؟

۱۳-۲-۹ سیمانی حاوی $10\% \text{ Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ، $25\% \text{ Ca}_3\text{SiO}_5$ ، و $65\% \text{ Ca}_2\text{SiO}_4$ است. در اولین مراحل خودگیری، دما 7°C بالاترفته است. اگر این مخلوط بتن با مخلوط موجود در مثال ۱۳-۲-۴ قابل مقایسه باشد، پس از ایدن مرحله اولیه چند درصد از کل گرمای آبدار کردن باقی می‌ماند.

جواب: 11%

۱۳-۳-۱ چگالی انباشتی مقداری چوب خشک تقریباً برابر 47 g/cm^3 است. در صورتی که چگالی حقیقی چوب خشک 47 g/cm^3 (175 Mg/m^3) باشد، درصد تخلخل را برآورد کنید.

جواب: $47/0$ کل تخلخل.

۱۳-۳-۲ تخته‌ای که طول آن در جهت شعاعی است از چوب صنوبر داگلاس، وقتی که 18 درصد رطوبت داشته به اندازه $91 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ (اسماً 4×1) بریده شده است. اگر دوسوم رطوبت خود را از دست بدهد، سطح مقطع آن چه ابعادی خواهد داشت؟

۱۳-۳-۳ میزان رطوبت چوب در حالت تعادل می‌تواند از 6 درصد در زمستان تا 14 درصد در تابستان تغییر کند. تغییر ابعاد ششماهه سطح میزی از صنوبر داگلاس به ابعاد $20 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ را محاسبه کنید. الف) وقتی که طول آن در جهت شعاعی اره شده باشد (پهنای آن شعاعی است)؛ ب) وقتی ضخامت آن در جهت شعاعی اره شده باشد (پهنای آن مماسی است).

جواب: الف) $\Delta w = 11 \text{ mm}$ $\Delta t = 0.4 \text{ mm}$ هیچ $\Delta l =$

$$\Delta l = \text{هیچ} \quad \Delta t = 0.2 \text{ mm} \quad \Delta w = 1.8 \text{ mm} \text{ (ب)}$$

۴-۳-۱۳ در ساخته شده در مثال ۱-۳-۱۳ بسته شده سپس میزان رطوبت از ۹ درصد به ۱۴ درصد افزایش یافته است. اگر در ۳۵ mm ضخامت داشته باشد چه نیرویی در آن به وجود می آید؟ فرض کنید که زهوارهای در صلب باشد.

۵-۳-۱۳ در مسئله ۳-۳-۱۳ قسمت (الف)، فرض کنید که لبه های میز در فصل تابستان بایست گرفته شده است. اگر $S_t = 110 \text{ MPa}$ ، آیا سطح میز در زمستان شکاف برمی دارد؟ در صورتی که گستره های آن معلوم باشد. مقادیر فرضی خود را ذکر کنید.

جواب: فرض کنید $S_t = 20 S_r$ ، و از مقدار بحرانیتر مدول یانگ $S = 12 \text{ MPa} > 55 \text{ MPa}$ استفاده کنید. در نتیجه چوب شکاف برخواهد داشت.

۶-۳-۱۳ روکش چوب درخت غوشه به فنل فرم آلدئید آغشته شده است [شکل ۷-۴-۱۳ (ب)] تا مقاومت آن در برابر آب زیاد شود و منحنی محصول نهایی بالا رود. اگر چه روکش خشک فقط 56 g/cm^3 وزن دارد، وزن مخصوص واقعی ترکیب سلولز - لیگنین برابر ۱۵۲ (است. الف) برای آغشته کردن 10000 mm^3 چوب درخت غوشه، چند گرم فنل فرم آلدئید (PF) لازم است؟ (ب) چگالی نهایی چقدر است؟

جواب: الف) 82 g PF (ب) $138 \text{ g/cm}^3 (= 138 \text{ Mg/m}^3)$

۷-۳-۱۳ از زمستان تا تابستان، سطح میز مسئله ۳-۳-۱۳ چه مقدار آب جذب می کند در صورتی که جنس آن الف) از بالزا (16 g/cm^3 خشک) و ب) از چوب غوشه (56 g/cm^3 خشک) باشد؟ علت جذب بیشتر چوب غوشه را توضیح دهید.

جواب: الف) 350 g (ب) 1200 g

۸-۴-۱۳ مدول کشسانی میله ای از پلی استیرن را که با شیشه بوروسیلیکات تقویت شده و تمام رشته های شیشه در جهت طولی قرار گرفته اند، حساب کنید. 80 W/O شیشه وجود دارد.

جواب: 46000 MPa

۹-۴-۱۳ مدول کشسانی برای دولایه غیر هم جهت مسئله ۷-۴-۱۰ چقدر است؟

۱۰-۴-۱۳ میله پلاستیکی تقویت شده با شیشه ای (چوب ماهیگیری) از 67 W/O شیشه بوروسیلیکات در زمینه پلی استیرن ساخته شده است. ضریب انبساط گرمایی چقدر است؟

جواب: $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

۱۱-۴-۱۳ سیمی از فولاد AISI-SAE ۱۰۴۰ (با سطح مقطع 1 mm^2) دارای روکشی آلومینیومی است، به طوری که کل سطح مقطع 1.2 mm^2 است. الف) چه کسری از بار

چدن، بتن، چوب و مواد چندسازه ۶۲۷

۴۵۰ N توسط فولاد حمل می‌شود؟ ب) مقاومت الکتریکی این سیم در واحد طول چقدر است؟

۱۳-۴-۵ سیم فولادی ۲۵ میلی‌متری با 5 mm مس پوشانده شده است (کل قطر $= 3\text{ mm}$). این سیم تحت بار 4450 N قرار داده شده است. الف) کرنش کشان چقدر است؟ ب) اگر کل قطر از فولاد 1040 تشکیل شده باشد چه مقدار کرنش صورت می‌گیرد؟ ج) اگر کل سیم از مس باشد چطور؟

جواب: الف) 0.003

۱۳-۴-۶ فولاد 1020 مسئله قبل که روکش مسی دارد، در 400°C (750°F) تنشگیری و سریعاً تا 10°C (50°F) سرد شده است. الف) کدام فلز تحت کشش است؟ ب) تنش چقدر است؟

۱۳-۴-۷ به سیم فولادی ۲۵ میلی‌متری ($\rho = 200\ \Omega \cdot \text{nm}$) مسی خواهیم روکشی از مس دهیم به طوری که مقاومت آن $33 \times 10^{-2}\ \Omega/\text{m}$ شود. ضخامت روکش چقدر باید باشد؟

جواب: 0.5 mm

پيوسٽيا

- الف) ثابتها و ضرايب تبديل
- ب) جدول عناصر مهم
- ج) خواص مواد مهم مهندسي (20°C)
- د) فرهنگ اصطلاحات

پیوست الف. ثابتها و ضرایب تبدیل

ثابتها*

$9.80665 \times 10^8 \text{ m/s}^2$	شتاب ثقل، g
$1.660538921 \times 10^{-24} \text{ g}$	واحد جرم اتمی، amu
$6.02214076 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$	عدد آوگادرو، N
$8.617333262 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$	ثابت بولستمان، k
$1.3806504 \times 10^{-16} \text{ J/K}$	
$8.314472 \text{ J/mole}\cdot\text{K}$	
$8.854187817 \times 10^{-12} \text{ C/V}\cdot\text{m}$	ظرفیت (خلاء)، ϵ
$1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$	بار الکترون، q
$9.274009994 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$	گشتاور الکترون، β
$1.602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$	الکترون ولت، eV
$9.460730472 \times 10^{13} \text{ s}$	فاراده، \mathcal{F}
$0.000119326 \text{ kg/m}^3$	ترکیب اوتکتوئید $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$
727.32°C (1340°F)	دمای اوتکتوئید $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$
$8.314472 \text{ J/mole}\cdot\text{K}$	ثابت گازها، R
$1.98756 \text{ cal/mole}\cdot\text{K}$	
$22.71098 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mole}$	حجم گاز (STP)
$6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	ثابت پلانک، h
$299792458 \times 10^8 \text{ m/s}$	سرعت نور، c

ضرایب تبدیل*

$$\begin{aligned}
 1 \text{ آمبر} &= 1 \text{ C/s} \\
 1 \text{ آنگستروم} &= 10^{-10} \text{ m} \\
 &= 10^{-8} \text{ cm} \\
 &= 0.1 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

* تمام مقادیر بی معنی، به عدد کوچکتر گرد شده اند.

$$= 3.937 \times 10^{-9} \text{ in}$$

$$1 \text{ amu} = 1.66 \dots \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$1 \text{ Btu} = 1.055 \dots \times 10^3 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu}/^{\circ}\text{F} = 1.085 \dots \times 10^3 \text{ J}/^{\circ}\text{C}$$

$$1 [\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{s})]/[^{\circ}\text{F}/\text{in}] = 0.519 \dots \times 10^3 [(\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))]/[^{\circ}\text{C}/\text{m}]$$

$$= 0.519 \times 10^3 (\text{W}/\text{m}^2)/(^{\circ}\text{C}/\text{m})$$

$$1 \text{ Btu} \cdot \text{ft}^2 = 1.055 \dots \times 10^3 \text{ J}/\text{m}^2$$

$$1 \text{ کالری گرم} = 4.18 \dots \text{ J}$$

$$1 \text{ سانتی متر} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$= 0.3937 \text{ in}$$

$$1 \text{ کولن} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ سانتی متر مکعب} = 0.061 \dots \text{ in}^3$$

$$1 \text{ اینچ مکعب} = 1.639 \dots \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 ^{\circ}\text{C اختلاف} = 1.8 ^{\circ}\text{F}$$

$$1 \text{ الکترون ولت} = 0.16 \dots \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$1 ^{\circ}\text{F اختلاف} = 0.555 \dots ^{\circ}\text{C}$$

$$1 \text{ فوت} = 0.3048 \dots \text{ m}$$

$$1 \text{ پوند نیرو} = 1.355 \dots \text{ J}$$

$$1 \text{ گالن (واحدایعات در آمریکا)} = 3.785 \dots \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ گرم} = 0.001 \dots \times 10^{-24} \text{ amu}$$

$$1 \text{ گرم}/\text{cm}^3 = 2.2 \dots \times 10^{-3} \text{ lb}_m$$

$$= 62.4 \dots \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$= 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$= 1 \text{ Mg}/\text{m}^3$$

$$1 \text{ اینچ} = 0.0254 \dots \text{ m}$$

$$1 \text{ ژول} = 0.947 \dots \times 10^{-3} \text{ Btu}$$

$$= 0.239 \dots \text{ cal, g}$$

$$= ۶۰۲۴... \times ۱۰^{۱۸} \text{eV}$$

$$= ۰.۷۳۷... \text{ft} \cdot \text{lb}_f$$

$$= \text{وات} \cdot \text{ثانیه}$$

$$۱ \text{ ژول بر متر مربع} = ۸۸۵... \times ۱۰^{-۵} \text{Btu/ft}^2$$

$$۱ [^\circ\text{C/m}] / [^\circ\text{F/in}] = ۱.۸ \times ۱۰^{-۲} [\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{s})] / [^\circ\text{F/in}]$$

$$۱ \text{ کیلوگرم} = ۲.۲۰... \text{lb}_m$$

$$۱ \text{ مگاگرم بر متر مکعب} = ۱ \text{ g/cm}^3$$

$$= ۱۰^6 \text{ g/m}^3$$

$$= ۱۰۰۰ \text{ kg/m}^3$$

$$۱ \text{ متر} = ۱۰^{۱۰} \text{\AA}$$

$$= ۱۰^9 \text{ nm}$$

$$= ۳.۲۸... \text{ft}$$

$$= ۳۹.۳۷ \text{ in}$$

$$۱ \text{ میکرومتر} = ۱۰^{-۶} \text{ m}$$

$$۱ \text{ نانومتر} = ۱۰^{-۹} \text{ m}$$

$$۱ \text{ نیوتن} = ۰.۲۲۴... \text{lb}_f$$

$$۱ \text{ اهم} = ۰.۲۵۴... \Omega \cdot \text{m}$$

$$۱ \text{ متر} = ۳۹.۳۷ \Omega \cdot \text{in}$$

$$۱ \text{ پاسکال} = ۰.۱۴۵... \times ۱۰^{-۲} \text{lb}_f/\text{in}^2$$

$$۱ \text{ پواز} = ۰.۱ \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$۱ \text{ نیوتن (نیرو)} = ۴.۴۴... \text{ نیوتن}$$

$$۱ \text{ پوند (جرم)} = ۰.۴۵۳... \text{ kg}$$

$$۱ \text{ پوند بر فوت مکعب} = ۱۶۰... \text{ kg/m}^3$$

$$۱ \text{ پوند بر اینچ مربع} = ۶.۸۹... \times ۱۰^{-۲} \text{ MPa}$$

$$۱ \text{ وات} = ۱ \text{ J/s}$$

$$۱ (^\circ\text{C/m}) / (^\circ\text{F/in}) = ۱.۸ \times ۱۰^{-۲} [\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{s})] / [^\circ\text{F/in}]$$

پیشوندهای سیستم متریک

10^9	G	گیگا
10^6	M	مگا
10^3	k	کیلو
10^{-3}	m	میلی
10^{-6}	μ	میکرو
10^{-9}	n	نانو

پیوست ب. جدول عناصر مهم

شعاع بونی، nm	ظرفیت	شعاع اتمی تقریبی، nm°	شمار بلوری، °C	ساختار بلوری، °C	چگالی (جامد) Mg/m ³ (=g/cm ³)	نقطه ذوب، °C	اریناها	عدد جرم اتمی، amu	نشانه اتمی	عصر
خیلی کم	۱+	۰۰۰۴۶	—	—	—	—۲۵۹۱۴	۱s	۱۰۰۰۷۸	۱	هیدروژن H
—	خفنی	۰۰۱۷۶	—	—	—	—۲۷۲۲۲	۲s ۲p	۴۰۰۰۳	۲	هلیوم He
۰۰۰۶۸	۱+	۰۰۱۵۱۹	dec	—	۰۰۵۳۴	۱۸۰	He+۱	۶۰۹۴	۳	لیتیم Li
۰۰۰۳۵	۲+	۰۰۱۱۴	hcp	—	۱۰۸۵	۱۲۸۹	He+۲	۹۰۰۱	۴	برلیوم Be
۰۰۰۰۲۵	۳+	۰۰۰۴۶	—	—	۲۳۴	۲۱۰۳	He+۲	۱۰۰۸۱	۵	بور B
—	—	۰۰۰۷۷	hex	—	۲۲۵	>۳۵۰۰	He+۲	۱۲۰۰۱۱	۶	کربن C
—	۳-	۰۰۰۷۱	—	—	—	—۲۱۰	He+۲	۱۴۰۰۰۷	۷	نیتروژن N
۰۰۱۴۰	۲-	۰۰۰۶۰	—	—	—	—۲۱۸۲۴	He+۲	۱۵۰۹۹۹	۸	اکسیژن O
۰۰۱۳۳	۱-	۰۰۰۶	—	—	—	—۲۲۰	He+۲	۱۹۰۰۰	۹	فلور F
—	خفنی	۰۰۱۶۰	fcc	—	—	—۲۴۸۲۷	He+۲	۲۰۰۱۸	۱۰	نئون Ne

		rs		rp			
		rs		rp			
۰۰۰۹۷	۱+	۰۰۱۸۵۷	bcc	۰۰۹۷	۹۷۰۸	Ne+۱	۲۲۰۹۹ ۱۱ Na
۰۰۰۹۶	۲+	۰۰۱۶۱	hcp	۱۰۷۳	۶۴۹	Ne+۲	۲۲۰۳۱ ۱۲ Mg
۰۰۰۵۱	۲+	۰۰۱۴۳۱۵	fcc	۲۰۷۰	۶۶۰۰۲	Ne+۲	۲۶۰۹۸ ۱۳ Al
۰۰۰۴۲	۲+	۰۰۱۱۷۶	...	۲۰۳۳	۱۴۱۴	Ne+۲	۲۸۰۵۹ ۱۴ Si
۰۰۰۳۵	۵+	۰۰۱۱	—	۱۰۸	۴۲	Ne+۲	۳۰۰۹۷ ۱۵ P
۰۰۱۸۴	۲-	۰۰۱۰۶	—	۲۰۵۷	۱۱۲۰۸	Ne+۲	۳۲۰۵۶ ۱۶ S
۰۰۱۸۱	۱-	۰۰۰۹۵۵	—	—	—۱۰۱	Ne+۲	۳۵۰۲۵ ۱۷ Cl
—	خشی	۰۰۱۹۲	fcc	—	—۱۸۹۰۲	Ne+۲	۳۹۰۹۵ ۱۸ Ar
rd rs rp							
۰۰۱۳۳	۱+	۰۰۲۳۱۲	bcc	۰۰۸۶	۶۳	Ar+۱	۳۹۰۱۰ ۱۹ K
۰۰۰۹۹	۲+	۰۰۱۹۶۹	fcc	۱۰۵۳	۸۴۰	Ar+۱	۴۰۰۵۸ ۲۰ Ca
۰۰۰۶۸	۲+	۰۰۱۴۶	hcp	۲۰۵۱	۱۶۷۲	Ar+۲	۴۷۰۹۰ ۲۲ Ti
۰۰۰۶۳	۲+	۰۰۱۲۲۹	bcc	۲۰۲۰	۱۸۶۳	Ar+۵	۵۲۰۰۰ ۲۴ Cr
۰۰۰۸۰	۲+	۰۰۰۱۱۲	—	۷۰۲	۱۲۴۶	Ar+۵	۵۴۰۹۴ ۲۵ Mn
۰۰۰۷۲	۲+	۰۰۱۲۲۱	bcc	۷۰۸۸	۱۵۳۸	Ar+۶	۵۵۰۸۵ ۲۶ Fe
۰۰۰۶۴	۲+	۰۰۱۲۶۹	fcc				

پتاسیم

کلسیم

تیتانیوم

کروم

منگنز

آهن

سدیم

منیزیم

آلومینیم

سیلیسیم

فسفر

گوگرد

کلر

آرگون

۰۰۵۰۷۲	۲+	۰۰۱۲۵	hcp	۸۰۹	۱۲۹۲	Ar+۷	۲	۵۸۰۹۳	۷۷	Co	جالت
۰۰۵۰۶۹	۲+	۰۰۱۲۴۶	fcc	۸۰۹۰	۱۲۵۵	Ar+۸	۲	۵۸۰۷۱	۷۸	Ni	نیکل
۰۰۵۰۹۶	۱+	۰۰۱۲۷۸	fcc	۸۰۹۲	۱۰۸۷۰۵	Ar+۱۰	۱	۶۳۰۵۴	۲۹	Cu	مس
۰۰۵۰۷۲	۲+	۰۰۱۳۹	hcp	۷۰۱۲	۲۱۹۰۶	Ar+۱۰	۲	۶۵۰۲۷	۴۰	Zn	روی
—	۲+	۰۰۱۲۲۲	...	۵۰۲۵	۹۳۷	Ar-۱۰	۲	۷۲۰۵۹	۴۲	Ce	ذرمانیم
—	۲+	۰۰۱۲۵	—	۵۰۷۳	~۸۰۹	Ar+۱۰	۲	۷۳۰۹۲	۴۳	As	ارستیک
—	خفتی	۰۰۲۵۱	fcc	—	-۱۵۷	Ar+۱۰	۲	۸۳۰۸۰	۴۶	Kr	کریپتون

۲d ۵s ۵p

۰۰۱۲۶	۱+	۰۰۱۲۲۲	fcc	۱۰۰۵	۹۶۱۰۹	Kr+۱۰	۱	۱۰۷۰۸۷	۷۷	Ag	نقره
۰۰۵۰۷۱	۲+	۰۰۱۵۵۹	bct	۷۰۳	۲۳۲	Kr+۱۰	۲	۱۱۸۰۶۹	۵۰	Sn	قلع
—	۵+	۰۰۱۲۵۲	—	۶۰۷	۶۳۰۰۷	Kr+۱۰	۲	۱۲۱۰۷۵	۵۱	Sb	آنتیموان
۰۰۲۲۰	۱-	۰۰۱۳۵	مکعب مستطیل	۴۰۹۳	۱۱۲	Kr+۱۰	۲	۱۲۶۰۹	۵۲	I	ید
—	خفتی	۰۰۲۲۱	fcc	۲۰۷	-۱۱۲	Kr+۱۰	۲	۱۳۱۰۳	۵۲	Xe	گزرون

پیوست ب (ادامه)

عنصر	نشانه	عدد اتمی	جرم اتمی، amu	ارینیا لها	نقطه ذوب، °C	چگالی (جامد)، Mg/m ³ (=g/cm ³)	ساختار بلوری، °C	شعاع اتمی، تقریبی، nm°	ظرفیت شمعان اتمی، شمعان یونی، nm°
۲f ۵d ۶s									
سزیم	Cs	۵۵	۱۳۲۹	۱	Xe+	۲۸۵۲	bcc	۰۰۲۶۲	۱+
تنگستن	W	۷۴	۱۸۳۹	۲	Xe+۱۲	۳۳۸۷	bcc	۰۰۱۳۶۷	۴+
طلا	Au	۷۹	۱۹۷۰	۱	Xe+۱۲	۱۹۳۲	fcc	۰۰۱۴۲۱	۱+
جیوه	Hg	۸۰	۲۰۰۶	۲	Xe+۱۲	—	—	۰۰۱۵۵	۲+
سرب	Pb	۸۲	۲۰۷۲		Hg+۶p ^۱	۲۲۷۵	fcc	۰۰۱۷۵۰	۲+
اورانیم	U	۹۲	۲۳۸۰		Rn+۵f ^۳ d ^۱ ۷s ^۱	۱۱۳۳	—	۰۰۱۳۸	۴+

* نصف نزدیکترین فاصله بین دو اتم در عنصر جامد. برای ساختارهای غیر مکعبی، میانگین فاصله اتمی داده شده است. مثال در hcp اتم اندکی بیشتری شکل است.

** شعاع برای $CN=۶$ ؛ درغین این صورت، $R_{CN=۴}=۱.۱$ $R_{CN=۶}\approx R_{CN=۷}\approx ۰.۹۷$ ر.

*** مکعب الماسی.

پیوست ج. خواص مواد مهم مهندسی (20°C)

\bar{E}	میانگین مدول کشسان،	اهم-متر	مقاومت ویژه الکتریکی،	انبساط خطی، $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$	رسانندگی گرمایی، $\left(\frac{\text{mm}^2}{\text{وات}}\right) \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{mm}}\right)^{**}$	چگالی، Mg/m^3 ($= \text{g/cm}^3$)	ماده
Psi	MPa						فلزات
10×10^6	70000	29×10^{-9}	22.5×10^{-6}	0.22	27	آلومینیم (99.9+)	
10×10^6	70000	$\sim 45 \times 10^{-9}$	22×10^{-6}	0.16	27(+)	آلیاژهای آلومینیم	
16×10^6	110000	62×10^{-9}	20×10^{-6}	0.12	85	برنج (70Cu-30Zn)	
16×10^6	110000	$\sim 100 \times 10^{-9}$	18×10^{-6}	0.08	88	مفرغ (95Cu-5Sn)	
$20 \times 10^6 \pm$	$140000(\pm)$	—	10×10^{-6}	—	715	چدن (خاکستری)	
30×10^6	205000	660×10^{-9}	9×10^{-6}	—	77	چدن (سفید)	
16×10^6	110000	17×10^{-9}	17×10^{-6}	0.40	89	مس (99.9+)	
30×10^6	205000	98×10^{-9}	11.7×10^{-6}	0.077	788	آهن (99.9+)	
2×10^6	14000	206×10^{-9}	29×10^{-6}	0.033	1134	سرب (99+)	
5×10^6	45000	45×10^{-9}	25×10^{-6}	0.16	174	میتیزیم (99+)	
26×10^6	180000	482×10^{-9}	15×10^{-6}	0.025	88	مونل (70Ni-30Cu)	
11×10^6	75000	18×10^{-9}	18×10^{-6}	0.41	104	نقره (استرلینگ)	
30×10^6	205000	169×10^{-9}	11.7×10^{-6}	0.050	786	فولاد (1020)	

فلزات

آده	چگالی، Mg/m^3 ($=g/cm^3$)	رسانندگی گرمایی، $\left(\frac{Watt}{mm^2}\right) \left(\frac{^{\circ}C}{mm}\right)$	انبساط خطی، $^{\circ}C^{-1}$	مقاومت ویژه الکتریکی، ا.م.متر	میانگین مدول کسسان، E
لاد (۱۰۴۰)	۷۷۸۵	۰۰۵۴۸	1193×10^{-6}	171×10^{-9}	30×10^9
لاد (۱۰۸۰)	۷۷۸۴	۰۰۵۴۶	1098×10^{-6}	180×10^{-9}	30×10^9
لاد (زنگ نزن)	۷۷۹۳	۰۰۵۱۵	16×10^{-6}	700×10^{-9}	30×10^9
(۱۸Cr-۸۱)					
آهیکها					
Al۲۱	۳۷۸	۰۰۵۲۹	9×10^{-6}	$> 10^{12}$	50×10^9
ساختمانی	۲۷۳(±)	۰۰۵۵۵۶	9×10^{-6}	—	—
نسوز	۲۷۱	۰۰۵۵۵۸	375×10^{-6}	192×10^9	—
گرا نیتری	۱۷۵	—	5×10^{-6}	—	—
کف سازی	۲۷۵	—	4×10^{-6}	—	—
سیلیسی	۱۷۷۵	۰۰۵۵۵۸	—	192×10^9	—
ه	۲۷۲(±)	۰۰۵۵۱۵	13×10^{-6}	—	2×10^9
سطح	۲۷۵	۰۰۵۵۵۷۵	9×10^{-6}	10^{12}	10×10^9
بور و سیلیکاتی	۲۷۴	۰۰۵۵۱۵	277×10^{-6}	$> 10^{15}$	10×10^9

سیلیسی	۱۰X۱۰ ^۹	۷۰۰۰۰	۱۰ ^{۱۸}	۰۰۵X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۱۲	۲۰۲
وبکور	—	—	—	۰۰۶X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۱۲	۲۰۲
پشم شیشه	—	—	—	—	۰۰۵۰۰۲۵	۰۰۵
گرافیت (نوده)	۱X۱۰ ^۹	۷۰۰۰	۱۰ ^{-۵}	۵X۱۰ ^{-۶}	—	۱۰۹
MgC	۳۰X۱۰ ^۹	۲۰۵۰۰۰	۱۰ ^۳ (۱۱۰۰°C)	۹X۱۰ ^{-۶}	—	۳۰۶
توراتر (SiO _۲)	۲۵X۱۰ ^۹	۳۱۰۰۰۰	۱۰ ^{۱۲}	—	۰۰۵۰۱۲	۲۰۶۵
SiC	—	—	۰۰۲۵(۱۱۰۰°C)	۲۰۵X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۱۲	۳۰۱۷
TiC	۵۰X۱۰ ^۹	۲۵۰۰۰۰	۵۰X۱۰ ^{-۸}	۷X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۳۰	۲۰۵

همه ها

زمین فرم آلومین	۱۰۳X۱۰ ^۹	۹۰۰۰	۱۰ ^{۱۱}	۲۷X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۳۰	۱۰۵
فرم آلومین	۰۰۵X۱۰ ^۹	۲۵۰۰	۱۰ ^{۱۰}	۷۲X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۱۶	۱۰۳
فرم آلومین	۱۰۵X۱۰ ^۹	۱۰۳۰۰	۱۰ ^{۱۰}	۲۷X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۳۰	۱۰۵
سینکها (مصنوعی)	۶۰۰-۱۱۰۰۰	۴-۷۵	—	—	۰۰۵۰۰۱۲	۱۰۵
سینک (ورلکایده)	۰۰۵X۱۰ ^۹	۲۵۰۰	۱۰ ^{۱۲}	۸۱X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۱۲	۱۰۲
لایتین (L.D.)	۱۴۰۰۰-۵۰۰۰۰	۱۰۰-۲۵۰	۱۰ ^{۱۳} -۱۰ ^{۱۶}	۱۸۰X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۳۴	۰۰۹۲
لایتین (H.D.)	۵۰۰۰۰-۱۸۰۰۰	۲۵۰۰-۱۲۵۰	۱۰ ^{۱۲} -۱۰ ^{۱۶}	۱۲۰X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۵۲	۰۰۹۶
استیرن	۰۰۴X۱۰ ^۹	۲۸۰۰	۱۰ ^{۱۶}	۶۳X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۵۸	۱۰۰۵
وینیلین کلرید	۰۰۵X۱۰ ^۹	۳۵۰	۱۰ ^{۱۱}	۱۹۰X۱۰ ^{-۶}	۰۰۵۰۰۱۲	۱۰۷

پیوست ج: (ادامه)

ده	چگالی، Mg/m^3 ($=g/cm^3$)	رسانندگی گرمایی، $\left(\frac{W}{m^2}\right) \left(\frac{^{\circ}C}{mm^2}\right)$	انبساط خطی، $^{\circ}C^{-1}$	مقاومت ویژه الکتریکی، اهم.متر	میانگین مدول کنسان، E
Psi	MPa				
۵۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	۳۵۰-۷۰۰	100×10^{-6}	10^{14}		
0.5×10^6	۳۵۰۰	90×10^{-6}	10^{14}		
0.4×10^6	۲۸۰۰	100×10^{-6}	10^{12}		
		0.000025			
	۱۲۱۵				

آدهای این جدول از منابع مختلف برداشته شده است.

شق دیگی آن، $(W/mm^2)/(K/mm)$ ، ضربدر 1.94 ، $Btu/(Ft^2.s)/(^{\circ}F/in)$ به دست می آید.

* یا، K^{-1} ، با تقسیم کردن بر 1.8 ، $^{\circ}F^{-1}$ به دست می آید.

* اهم متن ضربدر 39 ، اهم اینج به دست می آید.

پیوست ۵. فرهنگ اصطلاحات

- Abrasive (سایا). ماده سخت و از نظر مکانیکی مقاوم که برای سنگزنی و برش به کار می‌رود و معمولاً از مواد سرامیکی ساخته می‌شود.
- Absorption (جذب). جذب و تحلیل حجمی (به adsorption رجوع کنید).
- $A_m B_n X_p$ compounds (ترکیبات $A_m B_n X_p$). ترکیبات سه‌تایی. در این کتاب X معمولاً اکسیژن است؛ A و B معمولاً اتم‌های فازی‌اند.
- Acceptor levels (ترازهای پذیرنده). ترازهای انرژی حامل‌های نوع p (شکاف الکترونی).
- Acceptor saturation (اشباع ترازهای پذیرنده). ترازهای پذیرنده بر شده در نیم‌رساناهای نوع p . در نتیجه آن، فعال‌سازی گرمایی تعداد حامل‌های خارجی را افزایش نمی‌دهد.
- Activation energy (انرژی فعال‌سازی). سد انرژی که قبل از واکنش باید بدان رسید.
- Addition polymerization (پلی‌مر کردن افزایشی). پلی‌مرکسودن با افزایش تدریجی مونومرها...
- Additive properties (خواص افزایشی). خواص مخلوط که فقط به‌شکل هندسی بستگی دارد (نه به هم‌کنش فازی).
- Adsorption (جذب سطحی). چسبندگی سطحی (به absorption رجوع کنید).
- Age-hardening (پیرسختی). (به رسوب سختی رجوع کنید)
- Agglomerated material (مواد هم‌جوش). ذرات ریزی که به هم می‌چسبند و توده متشکلی به وجود می‌آورند.
- Aggregate (مصلح دانه‌بندی شده). کلوخه ذرات درشتی که در بتن به کار می‌رود مثلاً ماسه و شن ریزه.
- AISI, SAE steels (فولادهای AISI, SAE). شاخص استاندارد شناسایی برای فولادهای ساده کربنی و کم‌آلیاژ که بر اساس ترکیب شیمیایی مشخص شده‌اند و شماره آخر مقدار کربن را نشان می‌دهد. (جدول ۹-۹-۱ را ببینید).
- Allotropism (چندگونی). polymorphism را ببینید.
- Alloy (آلیاژ). فلزی حاوی دو یا چند عنصر.
- Alloy retardation (تاخیر آلیاژی). کاهش میزان تجزیه استنیت به سبب وجود عناصر آلیاژی.
- Alloying elements (عناصر آلیاژی). عناصری که برای تشکیل آلیاژ افزوده می‌شوند (گاهی تحت عنوان آلیاژها نامیده می‌شوند).
- Alpha iron (آهن آلفا). آهن با ساختار مکعبی مرکز دار که در دمای متعارفی پایدار است.

- Amorphous (بی‌شکل). غیر بلورین و بدون نظم پرداخته.
- Anion (آنیون). یون منفی.
- Anisotropic (ناهمسانگرد). دارای خواص مختلف در جهات مختلف.
- Annealing (تابکاری). گرم و سرد کردن برای ایجاد نرمی.
- Annealing point (glass) (نقطه تابکاری (شیشه)). عملیات گرمایی برای تشگیری. دما باید ویسکوزیته‌ای برابر تقریباً 10^{13} pa.s به وجود آورد.
- Anode (آند). الکترودی که برای مدار خارجی الکترون تأمین می‌کند.
- Anodized (آندکاری‌شده). سطح پوشیده شده از لایه اکسید؛ که با به کار بردن این قطعه به عنوان آند در حمام الکترولیت حاصل می‌شود.
- Arrhenius equation (رابطه آرنیوس). رابطه فعالیت گرمایی (توضیح مثال ۴-۶-۲ را ببینید).
- Asbestos (پنبه نسوز). ماده سیلیکاتی رشته‌ای.
- ASTM grain-size number (عدد اندازه دانه ASTM). شمارش استاندارد دانه‌ها (معادله ۴-۳-۲ را ببینید).
- Atactic (بی‌آرایش). عدم وجود تکرار پرداخته در پلی‌مر (در مقایسه با تانک آرایش).
- Atomic mass unit (amu) (واحد جرم اتمی (amu)). یک دوازدهم جرم ^{12}C ؛ گرم بر $(10^{26} \times 0.602 \dots)$.
- Atomic number (عدد اتمی). تعداد الکترونهای متعلق به اتم بدون بار.
- Atomic packing factor (ضریب فشردگی اتمی). کسری از حجم که توسط اتمهای (با یونهای) «کروی» اشغال شده است.
- Atomic radius (elements) (شعاع اتمی (عناصر)). نصف فاصله بین اتمی.
- Atomic weight (وزن اتمی). جرم اتم بر حسب واحدهای جرم اتمی.
- Austempering (بازپخت استنیتی). فرایند تبدیل هم‌دما برای تشکیل بینیت.
- Austenite (γ) (استنیت (γ)). آهن مکعبی با وجوه مرکز پر، یا آلیاژ آهن با همین ساختار.
- Austenite decomposition (تجزیه استنیتی). واکنش اوتکتوئیدی که استنیت را به $(\alpha + \text{کاربید})$ تبدیل می‌کند.
- Austenite grain size (اندازه دانه استنیت). اندازه دانه ASTM را ببینید.
- Austenization (استنیتی کردن). عملیات گرمایی برای حل کربن در آهن fcc، و بدین وسیله تشکیل استنیت.
- Avogadro's number (N) (عدد آووگادرو (N)). تعداد amu در هر گرم؛ بنابراین تعداد مولکولها در هر مول.
- AX compounds (ترکیبات AX). ترکیبات دوتایی با نسبت یک به یک دو عنصر؛ معمولاً یونی.

- AX structure (CsCl) (ساختمان AX (CsCl)). ساختار ترکیب دوتایی با $CN=8$.
- AX structure (NaCl) (ساختمان AX (NaCl)). ساختار ترکیب دوتایی با $CN=6$.
- AX structure (ZnS) (ساختمان AX (ZnS)). ساختار ترکیب دوتایی با $CN=4$.
- A_mX_p structure (ساختمان A_mX_p). ترکیب دوتایی با نسبت اجزای نامساوی، (بخش ۸-۳ را ببینید).
- Axis (crystals) (محور (بلورها)). یکی از سه جهات اصلی بلور.
- Bainite (بینیت). میکروساختار کاربید بخش شده در فریت، که با تبدیل همدم در دمای پایین به دست می آید.
- Base (پایه). ناحیه مرکزی ترانزیستور.
- Bifunctional (دو عاملی). مولکول با دو محل واکنش برای اتصال مولکولهای مجاور.
- Body-centered cubic (bcc) (مکعب مرکز پر (bcc)). سلول واحدی که وضعیت مرکز آن مشابه وضعیت گوشه هاست.
- Bohr magneton (β) (مگنتون بوهر). گشتاور مغناطیسی الکترونهاى مجزا $(9.27 \times 10^{-24} \text{ amp} \cdot \text{m}^2)$.
- Boltzmann's constant (k) (ثابت بولتسمان). ضریب انرژی گرمایی $(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$.
- Bond angle (زاویه پیوند). زاویه بین پیوندهای فضا ویژه در مولکولها، یا جامدات کووالانس.
- Bond energy (انرژی پیوند). انرژی لازم برای جدا کردن دو اتمی که پیوند شیمیایی دارند. معمولاً به صورت انرژی بر مول $10^4 \times 60$ پیوند نوشته می شود.
- Bond length (طول پیوند). فاصله بین اتمی پیوند فضا ویژه.
- Boundary (microstructures) (مرز (میکروساختار)). سطح بین دو دانه یا بین دو فاز.
- Bragg's law (قانون براگ). قانون تفرق برای ساختارهای تناوبی (معادله ۸-۲).
- Branching (شاخه دار شدن). دو شاخه شدن در پلی مرک کردن افزایشی.
- Brass (برنج). آلیاژ مس و روی.
- Bravais lattices (شبکه براوه). ۱۴ شبکه بلوری اصلی.
- Brazing (لحمکاری سخت). متصل کردن فلزات در دمای بالای 425°C (800°F) ولی زیر نقطه ذوب فلزات متصل شونده.

Bridging oxygens (اکسیژنهای پل ساز)، اتمهای اکسیژن که بین دو چهاروجهی سیلیس به اشتراک گذاشته می شوند.

Brinell (برینل)، آزمایش سختی با استفاده از ساچمه کرومی. سختی توسط قطر تورفتگی معین می شود.

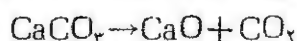
Brittle (قرد)، برعکس چقرمه؛ با جذب انرژی کمی می شکند.

Bronze (مفرغ)، آلیاژ مس و قلع (مگسراینکه طور دیگری مشخص شود، مثلاً مفرغ آلومینیمی آلیاژی از مس و آلومینیم است).

Burger's vector (b) (بردازر بوگر (b)). بردار تغییر مکان در اطراف نابجایی. بردار افزشی را بینید.

Butadiene-type compound (ترکیب نوع بوتادین). شکل اولیه چندین لاستیک بر اساس $C=C-C=C$ (جدول ۲-۷ را ببینید).

Calcination (تکلیس)، تجزیه جامد به گاز و جامد دیگر؛ مثلاً



Carbide (\bar{C}) (کاربید (\bar{C})). ترکیب فلز و کربن. این نام به کاربیدهایی که فلز اصلی آنها آهن است گفته می شود مگر آنکه به طور ویژه مشخص شده باشند.

Carbon steel (فولاد کربنی)، فولادی که در آن کربن عنصر آلیاژی متغیر اصلی است. (سایر عناصر آلیاژی فقط به مقادیر جزئی موجودند).

Carburize (کربن دهی)، وارد کردن کربن از سطح فولاد توسط نفوذ، برای تغییر خواص سطح.

Case (پوسته بیرونی)، ناحیه زیر سطح (معمولاً فولاد کربن داده شده).

Case-hardening (برون سخت سازی)، سخت کردن با ایجاد پوسته ای با کربن بیشتر.

Cast iron (چدن)، آلیاژ $Fe-C$ حاوی به حد کافی کربن، برای ایجاد مایع اوتکتیک در حین انجماد. در عمل معمولاً به معنی آن است که کربن بیشتر از آنکه بتواند در استنیت حل شود ($> 2\%$) وجود داشته باشد. همچنین به چدن خاکستری، چکش خوار و سفید رجوع کنید.

Casting (ریخته گری)، فرایند ریختن مایع یا مواد معلق در قالب، آنچه که از این فرایند به دست می آید قطعه ریخته گری نامیده می شود.

Catalyst (کاتالیزور)، افزودنی قابل استفاده مجدد برای فعال سازی واکنش شیمیایی.

Cathode (کاتد)، الکترودی که از مدار خارجی الکترون دریافت می کند.

Cathode reactions (واکنشهای کاتدی)، واکنشهای احیا (مصرف الکترون) در الکترود گالوانی.

Cation (کاتیون)، یون مثبت.

C-Curve (منحنی C)، منحنی تبدیل همدم.

Cell (galvanic) (سلول گالوانی). اجتماع دو الکترود در يك الكتروليت.
Cell, composition (سلول ترکیب). سلول گالوانی بین الکترودهایی با ترکیبات مختلف.

Cell, concentration (سلول غلظتی). سلول گالوانی حاصل از غلظتهای نامساوی الکترولیت (محلول رقیقتر آند را ایجاد می کند).

Cell, oxidation (سلول اکسایشی). سلول گالوانی حاصل از پتانسیلهای نامساوی اکسیژن (ناحیه کم اکسیژن آند را به وجود می آورد).

Cell, stress (سلول تنش). سلول گالوانی حاصل از آندی که به طور پلاستیکی تغییر شکل یافته است.

Cell, unit (سلول واحد). به unit cell رجوع کنید.

Cellulose (سلولز). پلی مر طبیعی $C_6H_{10}O_5$ (به معادله ۱۳-۳ رجوع کنید).

Cement (سیمان). ماده ای (معمولاً سرامیکی) برای چسباندن جامدات به یکدیگر.

Cement hydraulic (سیمان آبدار). سیمانی که توسط واکنش با آب پیوند

برقرار می کند.

Cement, portland (سیمان پرتلند). سیمان سیلیکات کلسیم آبدار.

Cementite (سمانیت). آهن کاربید (Fe_3C).

Center of gravity method (روش گرانیگاه). روش محاسبات تعیین فازها

ترکیب کلی در گرانیگاه اجزای وزنی قرار دارد.

Ceramics (سرامیکها). موادی حاوی ترکیبات عناصر فلزی و غیر فلزی.

Charge carrier (حامل بار الکتریکی). الکترونها در نوار رسانشی حامل

نوع n (منفی) را تأمین می کنند. شکافهای الکترونی در نوار ظرفیتی حامل نوع p (مثبت)

را به وجود می آورند.

Charge density (ρ) (چگالی بار). کوان بر واحد سطح.

Charpy (شارپی). یکی از دو آزمایش استاندارد ضربه، با استفاده از میله چهار گوش

شکاف دار.

Cis (polymers) ((پلی مرهای (سیس). پیشوندی که مکانهای اشباع نشده در

يك طرف زنجیر پلی مر را نشان می دهد.

Clay (رس). ذرات ریز جامد ($< 0.0044 \text{ mm}$). در سرامیکها، رسها به طور

ویژه، آلومینو سیلیکاتهایی صفحه ای شکل اند.

Cleavage (دخ بومی). صفحه ای که در امتداد آن جسم به آسانی به دو نیم می شود.

Coalescence (تجمع). تغییر از ذرات ریز بسیار زیاد به ذرات درشت کمتر.

Coercive force (electric, E_c) (نیروی پسماندزا (الکتریکی)). میدان

الکتریکی لازم برای از بین بردن قطبیت باقیمانده.

Coercive force (magnetic, H_c) (نیروی پسماندزا (مغناطیسی)). میدان

- مغناطیسی لازم برای از بین بردن خواص مغناطیسی باقیمانده.
- Cold work, % (درصد کار سرد). کرنش پلاستیکی محاسبه شده از تغییر سطح مقطع: $100(A_0 - A_f)/A_0$.
- Cold working (کار سرد، سرد کاری). تغییر شکل زیر دمای تبلور مجدد.
- Collector (کلکتور (گردآور)). قسمتی از تسرانزستور که حاملهای بار را از گسیلنده (امیتر) از طریق بیس دریافت می کند.
- Compact (ماده فشرده). شکل فشرده شده گرد قبل از تفجوشی.
- Component (design) (طراحی قطعه). طراحی و مهندسی قطعات مختلف ماشین یا مشابه آن.
- Component (phases) (جزء (فازها)). مواد شیمیایی اصلی لازم برای وجود آوردن مخلوط یا محلول شیمیایی.
- Composite (مواد چندسازه). ماده ای حاوی دو یا چند ماده مختلف.
- Compound (ترکیب). فازی متشکل از دو یا چند عنصر به نسبت معین.
- Concrete (بتن). ماده دانه بندی شده ای از سنگریزه و سیمان آبی.
- Conduction band (باند رسانش). باند انرژی الکترونها ی رسانشی. الکترونها برای آنکه حامل باشند باید در این نوار قرار گیرند.
- Conduction electron (الکترون رسانشی). الکترونی که از شکاف انرژی صعود می کند تا به عنوان حامل بار منفی عمل کند.
- Conductivity (رسانندگی). انتقال انرژی گرمایی یا الکتریکی در طول شیب پتانسیل.
- Configuration (پیکربندی). ترتیب قرار گرفتن مرها در طول زنجیر پلی مر (عوض شدن این ترتیب مستلزم شکسته شدن پیوند است).
- Conformation (صورت بندی). چرخش یا پیچ دار شدن زنجیر پلی مر (تغییر آن فقط مستلزم چرخش پیوند است).
- Continuous cooling transformation (دگرگونی با سرد کردن مداوم). واکنش حرارتی در حین سرد کردن، به ویژه تجزیه استتیت.
- Cooling rate (سرعت سرد کردن). کاهش دما در ثانیه؛ به ویژه سرعت تغییر دمای دگرگونی.
- Coordination number (CN) (عدد کوئوردیناسیون (CN)). تعداد نزدیکترین یونها یا اتمهای همسایه.
- Copolymer (کوپلی مر). پلی مرهایی با بیش از یک نوع مر.
- Core (heat treating) (عملیات گرمایی). مغزه مرکز میله، درون پوسته.
- Corrosion (خوردگی). فاسد شدن و از بین رفتن توسط تهاجم شیمیایی.
- Coulombic forces (نیروی کولنی). نیروی بین ذرات باردار، به ویژه یونها.

- Covalent bond (پیوند کووالانسی). پیوند بین اتمی که از اشتراك يك جفت الکترون در دو اتم مجاور به وجود می آید.
- Creep (خزش). تغییر شکل آهسته با تنشهایی کمتر از استحکام تسلیم معمولی (معمولاً در دماهای بالا اتفاق می افتد).
- Creep rate (سرعت خزش). کرنش خزش در واحد زمان.
- Critical cooling rates (austenite decomposition) (سرعت بحرانی سرد کردن) (تجزیه استنیت) (CR_M). آهسته ترین سرعت سرد کردن است که فقط هارتنیزیت تولید می کند. CR_P سریعترین سرعت سرد کردن است که پرلایت تولید می کند.
- Critical shear stress (تنش برشی بحرانی). حداقل تنش تفکیک شده برای ایجاد برش.
- Cross linking (اتصال متقاطع). به هم بستن دوزنجیر پلی مرمجاور.
- Crystal (بلور). جامد از نظر فیزیکی یکنواخت، در سه بعد، با نظم پُر دامنه.
- Crystal direction (uvw) (جهت بلوری) (uvw). شعاعی از یک مبدأ اختیاری که از مکان انتخاب شده سلول واحد می گذرد. شاخصها، ضرایب شبکه آن مکان است.
- Crystal lattice (شبکه بلوری). ترتیب فضایی مکانهای معادل در بلور.
- Crystal plane (صفحه بلوری). ترتیب دوبعدی اتمها (به miller indices رجوع کنید).
- Crystal system (سیستم بلوری). ویژگیهای سلولهای واحد با تقارن محوری و ابعادی (جدول ۱-۱-۳).
- Crystallinity (polymers) (بلورینگی (پلی مرها)). جزء حجمی جامدی که ساختار بلورین دارد. (در مقایسه با ساختار بی شکل).
- Curie point (magnetic) (نقطه کوری (مغناطیسی)). دمای انتقال بین فرومغناطیس و پارامغناطیس.
- Current (I) (شدت جریان I). جریان بار مثبت (برعکس جهت حرکت الکترون).
- Current density (i) (چگالی شدت جریان). آمپر بر واحد سطح.
- Damping capacity (ظرفیت لرزه میرایی). تقلیل ارتعاشات مکانیکی.
- Defect structure (ساختار معیوب). ترکیباتی که نسبتهای اتمها یا یونهای آنها عدد صحیح نباشد. این ترکیبات در ساختار خود جاهای خالی یا اتمهای بین نشین دارند.
- Deformation, elastic (تغییر شکل کشسان). تغییر شکل قابل برگشت بدون تغییر مکان دائمی اتمی (یا مولکولی).
- Deformation, plastic (تغییر شکل پلاستیکی). تغییر شکل دائمی حاصل از تغییر مکان اتمها (یا مولکولها) به محیط جدید.
- Deformation crystallization (تبلور و تغییر شکل). تبلور حاصل از جدا شدن پلی مرها و ایجاد ترتیب خطی موازی.

- Degradation (ازهم پاشیدگی). ازهم پاشیدگی پای مرها و ایجاد مولکولهای کوچکتر.
- Degree of polymerization (n) (درجه پلیمر شدن). مر بر وزن مولکولی متوسط.
- Delocalization (عدم استقرار). اربیتالهای چند اتمی.
- Density, apparent (چگالی ظاهری). جرم تقسیم بر حجم ظاهری (ماده + منافذ بسته).
- Density, bulk (چگالی انباشتی). جرم تقسیم بر کل حجم.
- Density, true (چگالی حقیقی). جرم تقسیم بر حجم واقعی (بدون جای خالی).
- Dielectric (دی الکتریک). عایق، ماده ای که می تواند بین دو الکترود قرار گیرد بدون آنکه رسانایی ایجاد کند.
- Dielectric constant, relative (κ) (ثابت نسبی دی الکتریک (κ)). نسبت چگالی بار حاصل از میدان الکتریکی (۱) با و (۲) بدون وجود ماده.
- Dielectric strength (استحکام دی الکتریک). پتانسیل شکست الکتریکی عایق بر واحد ضخامت.
- Diffraction (X-ray) (تفرق (اشعه ایکس)). تفرق اشعه ایکس توسط اتمهایی یا فواصل منظم.
- Diffusion (نفوذ). حرکت اتمها یا مولکولها در ماده.
- Diffusivity (D) (نفوذ پذیری (D)). شار نفوذ بر واحد شیب غلظت.
- Dipole (دوقطبی). جفت الکتریکی با دوسر منفی و مثبت.
- Dipole moment (گشتاور دوقطبی). حاصل ضرب بار الکتریکی در فاصله بار.
- Directional solidification (انجماد جهتدار). خارج کردن گرما از یک سر قالب برای ایجاد انجماد.
- Dislocation, edge (\perp) (ناجایی لبه ای (\perp)). نقص خطی در لبه صفحه بلوری اضافی. بردار لغزش عمود بر خط نقص است.
- Dislocation, screw (\parallel) (ناجایی پیچی). نقص خطی با بردار لغزش موازی با خطی نقص.
- Dispersed phases (فازهای پراکنده). میکروساختار ذرات بسیار ریز در فاز زمینه.
- Domains (حوزه ها). ناحیه میکروساختاری با نظم مغناطیسی هماهنگ (یا نظم دوقطبی الکتریکی).
- Donor exhaustion (تخلیه ترازهای دهنده). تخلیه الکترونهای دهنده. به همین علت فعال سازی حرارتی بیشتر، تعداد حمل کننده های خارجی را افزایش نمی دهد.
- Donor levels (ترازهای دهنده). سطح انرژی حمل کننده نوع n (الکترون).

Drawing (کشیدن). شکل دادن مکانیکی توسط کشش از میان يك قالب. مثل کشش سیم (شکل ۲-۳-۶) و کشش ورق؛ معمولاً در دمایی زیر دمای تبلور مجدداً انجام می‌شود. Drawing (glass) (کشیدن شیشه)). شکل دادن با کشیدن شیشه و یسکوز از میان شیپوره و تولید ورق میله یا رشته.

Drift velocity (v) (سرعت رانش). برآیند سرعت الکترون در میدان الکتریکی.

Ductile fracture (شکست انعطاف پذیر). شکستی که با تغییر شکل پلاستیکی و در نتیجه با جذب انرژی همراه باشد.

Ductility (انعطاف پذیری). تغییر شکل دائمی قبل از شکست؛ که توسط ازدیاد طول یا کاهش سطح مقطع اندازه گیری می‌شود.

Elastic strain (کرنش کشسان). تغییر شکل غیردائمی.

Elastomer (الاستومر). پلیمر با کرنش کشسان زیاد. این کرنش از قطع زنجیر پلیمر ناشی می‌شود.

Electric field (\mathcal{E}) (میدان الکتریکی). گرادیان ولتاژ، ولت بر سانتی متر.

Electrical conductivity (σ) (رسانندگی الکتریکی (σ)). ضریب بین

شار بار و میدان الکتریکی. عکس مقاومت الکتریکی.

Electrical resistivity (ρ) (مقاومت ویژه الکتریکی (ρ)). مقاومت ماده‌ای

به ابعاد واحد. برعکس رسانندگی الکتریکی.

Electrode potential (ϕ) (پتانسیل الکترود (ϕ)). ولتاژ به وجود آمده

در الکترود (در مقایسه با الکترود مرجع استاندارد).

Electrolyte (الکتrolیت). محلول یونی رسانا (مایع یا جامد).

Electron charge (q) (بار الکترون (q)). بار 1.6×10^{-19} کولن (یا

1.6×10^{-18} آمپر. ثانیه) که توسط هر الکترون حمل می‌شود.

Electron hole (p) (حفرة الکترونی (p)). جای خالی الکترون در نوار ظرفیتی

که به عنوان حامل بار مثبت عمل می‌کند.

Electron-hole pair (جفت حفرة و الکترون). الکترون رسانی در باند

رسانی و شکاف الکترونی همراه در نوار ظرفیتی، که وقتی در نیمه رساناهای ذاتی

الکترونی از شکاف می‌پرد حاصل می‌شود.

Electronegativity (الکترونگاتیوی). مقدار جاذبه الکترون برای ویژگیهای

غیرفازی.

Electron repulsion (دافعه الکترون). نیروی دافعه الکترونیهای بسیار زیاد

در همان حومه. نیروی جاذبه پیوند را خنثی می‌کند.

Electroplating (آبکاری الکتریکی). فرایند کاتدی احیا، عکس خوردگی.

الکترونها توسط مدار خارجی تأمین می‌شوند.

Elongation (ازدیاد طول). کرنش محوری همراه با شکست (سنجه طولی باید

معین شود.)

End-quench test (آزمایش آب دادن انتها). آزمایش استاندارد توسط آب دادن از يك سر، برای تعیین سختی پذیری.

Endurance limit (حد دوام). حداکثر تنش مجاز برای چرخه پیمایی نامحدود.

Energy band (باند انرژی). سطوح مجاز انرژی برای الکترونهای ظرفیتی.

Energy distribution (توزیع انرژی). طیف سطوح انرژی که توسط

نماسازی گرمایی مشخص می شود.

Energy gap (E_g) (شکاف انرژی (E_g)). انرژیهای اشغال نشده بین نوار ظرفیتی

و نوار رسانش.

Energy well (چاه انرژی). حداقل انرژی پتانسیل بین اتمی.

Entrained air (هوایی که به همراه مواد هواده وارد بتن می شود). جابهای

(تقریباً ۱ میلی متری) هوا که به بتن اضافه می شود تا کار پذیری را بیشتر کند و صدما ت ناشی از یخبندان را کمتر کند.

Equiaxial (هم محور). ابعاد قابل مقایسه در سه جهت اصلی.

Equicohesive temperature (دمای هم دو سمنندی). دمایی که در آن

استحکام دانه ها و مرز دانه ها مساوی است.

Equilibrium (chemical) (تعادل). توقف واکنش (زیرا انرژی آزاد

به حداقل رسیده است).

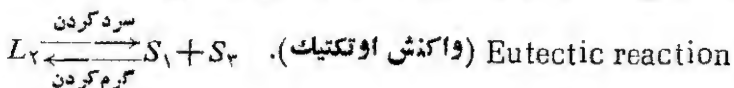
Equilibrium diagram (نمودار تعادلی). دجوع کنید به نمودار فازی.

Equivalent sites (مکانهای معادل). مکانهایی در شبکه بلوری که محیط کاملاً

یکسانی دارند.

Eutectic analysis (composition) (تجزیه اوتکتیک (ترکیب)). آنالیز

فاز محلول مایع با حداقل دمای ذوب (در محل تقاطع دو منحنی حلالیت).



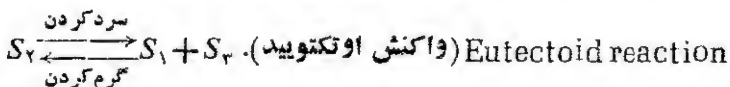
Eutectic temperature (دمای اوتکتیک). دمای واکنش اوتکتیک در محل

تقاطع دو منحنی حلالیت.

Eutectoid analysis (composition) (تجزیه اوتکتوئید (ترکیب)).

آنالیز فاز محلول جامد. با حداقل دمای تجزیه (در محل تقاطع دو منحنی حلالیت جامد).

Eutectoid ferrite (فریت اوتکتوئید). دجوع کنید به Ferrite, eutectoid.



Eutectoid shift (تغییر مکان اوتکتوئید). تغییر دما و آنالیز کربن واکنش

اوتکتوئید، حاصل از افزایش عناصر آلیاژی.

- Eutectoid temperature (دمای اوتکتوئید). دمای واکنش اوتکتوئید در محل تقاطع دو منحنی حلالیت جامد.
- Expansion coefficient (ضریب انبساط). رجوع کنید به thermal expansion.
- Extrinsic semiconductors (نیم رساناهای خارجی). رجوع کنید به Semiconductors.
- Extrusion (فشارکاری). شکل دادن با فشار دادن ماده در میان يك قالب (شکل ۶-۲-۲).
- Face-centered cubic (fcc) (مکعب با وجوه مرکز یو (fcc)). سلول واحدی که موقعیت، وجوه آن مشابه با موقعیت گوشه‌هاست.
- Family of directions $\langle uvw \rangle$ (جهات هم‌خانواده $\langle uvw \rangle$) جهات بلوری که بجز در مورد انتخاب اختیاری محورها یکسان‌اند.
- Family of planes $\{hkl\}$ (صفحات هم‌خانواده $\{hkl\}$). صفحات بلوری که بجز در مورد انتخاب اختیاری محورها یکسان‌اند.
- Faraday (F) (فاراده). بار واحد برای $10^{24} \times$ عدد الکترون (۵۶۵۰۰ کولن).
- Fatigue (خستگی). تمایل به شکست تحت تنشهای چرخه‌ای.
- Ferrite (ceramics) ((سرامیکهای) فریت). ترکیبات حاوی آهن سه‌ظرفیتی، معمولاً مغناطیسی.
- Ferrite (metals, α) (فریت (فلز، α) آهن مکعبی مرکز یو). یا آلیاژ آهنی با همین ساختار.
- Ferrite, eutectoid (فریت اوتکتوئید). فریتی که (همراه با کاربید) در حین تجزیه استنیت تشکیل می‌شود.
- Ferrite, proeutectoid (فریت پرو اوتکتوئید). فریتی که در دمای بالای اوتکتوئید از استنیت جدا می‌شود.
- Ferroelectric (فروالکتريک). موادی که خود به خود توسط خاصیت دو قطبی بودن مرتب می‌شوند.
- Ferromagnetic (فرومغناطیسی). موادی که خود به خود توسط خاصیت مغناطیسی بودن مرتب می‌شوند.
- Fiber-reinforced plastics (FRP) (پلاستیکهای تقویت شده با رشته‌ها (FRP)). ماده چندان سازۀ پشم شیشه و پلاستیکها.
- Fick's first law (قانون اول فیک). رابطه بین شار نفوذ و گرادیان غلظت.
- Firing (پختن). رجوع کنید به sintering.
- Flame-hardening (شعله سختی). سخت کردن با استفاده از گرمایش سطحی توسط شعله (به دنبال آن آب دادن).

- Fluidity (f) (سیالیت). ضریب قابلیت جریان یافتن؛ عکس ویسکوزیته.
- Fluorescence (فلوئورسانسی). که بلافاصله پس از تهییج اتفاق می افتد.
- Flux (diffusion, J) (شار (نفوذ، J)). انتقال بر واحد سطح و زمان.
- Forging (پتک کاری). شکل دادن مکانیکی با فشار (شکل ۶-۲-۲).
- Form $\{hkl\}$ (شکل $\{hkl\}$). صفحات بلوری که بجز در انتخاب اختیاری ما در مورد محورها یکسان اند.
- Fracture, brittle (شکست تود). شکست با پیشروی ترک و بدون انعطاف پذیری قابل توجه.
- Fracture, ductile (شکست انعطاف پذیر). شکست با پیشروی ترک به همراه تغییر شکل پلاستیکی.
- Frenkel defect (نقص فرنکل). تغییر مکان اتم یا یون (حاصل از تهییجی و اتم بین نشین).
- Functionality (عاملیت). تعداد مکانهای در دسترس برای واکنش در پلی مرشدن.
- Fusion (heat of) (گداز (گرمایی)). انرژی گرمایی لازم برای ذوب جامد بلورین.
- Gage length (سنجه طول). ابعاد اولیه برای تعیین ازدیاد طول (دجوع کنید به شکل ۲-۲-۱).
- Galvanic cell (سلول گالوانی). سلولی شامل دو فلز غیر مشاب به و یک الکترولیت.
- Galvanic protection (حفاظت گالوانی). حفاظتی که از فلز به وسیله قرار دادن آن به صورت کاتد در مقابل آنند قربانی انجام می شود.
- Galvanization (رویشنه کاری). فرایند پوشش دادن به فولاد توسط روی برای حفاظت گالوانی.
- Gamma iron (γ) (آهن گاما (γ)). دجوع کنید به Austenite.
- Glass (شیشه). جامد بی شکل زیر دمای تبدیل شیشه نظم پر دامنه بلوری را ندارد ولی معمولاً ترنیتی کم دامنه دارد.
- Glass transition temperature (T_g) (دمای انتقال شیشه (T_g)). دمای تبدیل بین مایع فوق تبرید و جامد شیشه ای آن.
- Grading (درجه بندی). تقسیم مجموعه بر حسب اندازه.
- Grain (metals and ceramics) (دانه (فلزات و سرامیکها)). بلورهای جداگانه میکروساختار.
- Grain (wood) (دانه (چوب)). درشت ساختار ناشی از چرخه رشد.
- Grain boundary (مرز دانه ها). ناحیه به هم خوردن نظم بلورین بین دودانه مجاور.
- Grain boundary area (S_V) (سطح مرز دانه ها (S_V)). سطح در واحد حجم؛ مثلاً mm^2/mm^3 یا in^2/in^3 .

Grain growth (رشد دانه‌ها). افزایش اندازه متوسط دانه با نفوذ اتمی از میان مرز دانه‌ها (یا فازها).

Grain size (اندازه دانه). قطر آماری دانه در یک سطح مقطع تصادفی (اندازه دانه‌های استنیت به صورت تعداد دانه‌های استنیت اولیه در سطح استاندارد بیان می‌شود. رجوع کنید به بخش ۴-۲).

Graphitization (گرافیتی کردن). تجزیه آهن کاربید به آهن و کربن (فرمول ۱۱-۱-۱).

Hard-drawn (کشش سخت). کار سرد برای به دست آوردن سختی بالا توسط کشیدن.

Hardenability (سختی پذیری). قابلیت به وجود آوردن سختی حداکثر با اجتناب از واکنش (کاربید + $\gamma \rightarrow \alpha$).

Hardenability curve (منحنی سختی پذیری). منحنی نمایش سختی میلۀ آزمایش آب دادن انتهایی.

Hardness (سختی). مقاومت در مقابل نفوذ.

Hardness traverse (سختی عرضی). منحنی مقادیر سختی.

Heat capacity (c) (ظرفیت گرمایی (c)). انرژی بر واحد دما، dH/dT .

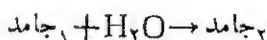
Hexagonal close-packed (hcp) (منشور شش بوشده hcp). شبکه بلور

شش وجهی با اتمهای شبکه در رئوس و درمکانهای مشابه در نیمۀ ارتفاع (به شکل ۳-۳-۲ رجوع کنید).

High-speed steels (فولاد تندبر). فولادهایی که با افزودن عناصر آلیاژی، کاربید آنها در مقابل دمای زیاد پایدار شده است.

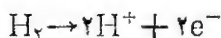
Hot-working (کارگرم، گرمکاری). تغییرشکلی که بالای دمای تبلور مجدد انجام شود، به طوری که در جریان تغییر شکل بازپخت نیز اتفاق افتد.

Hydration (آبدار کردن). واکنش شیمیایی با استفاده از آب:



Hydrogen bridge (پل هیدروژنی). پیوند واندروالزی که در آن اتم هیدروژن (پروتون) جذب الکترونهاي اتمهای همسایه شود.

Hydrogen electrode (الکترودهیدروژن). الکترودمرجع استاندارد با واکنش-نیم سلولی



Hydroplastic (هیدروپلاستیکی). خاصیت پلاستیکی در هنگام خیس بودن مثل رسها.

Hypoeutectoid (هیپوآئکتوئید). به steels, hypoeutectoid رجوع کنید.

Impact strenght (استحکام ضربه‌ای). به toughness رجوع کنید.
 Impressed voltage (ولتاژ مؤثر). ولتاژ Dc که برای کاتدی کردن فلز در حین کار استفاده می‌شود.

Induced dipole (دوقطبی القایی). دوقطبی الکتریکی که توسط میدان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید.

Induction hardening (سخت کردن القایی). سخت کردن با جریان القایی بر بسامد برای گرمایش سطحی.

Ingot (شمش). قطعه ریختگی بزرگی که متعاقباً نورد یا پتک کاری می‌شود.
 Inhibitor (بازدارنده). ماده افزودنی به الکرولیت که اثر ناپذیرسازی را بهتر می‌کند.

Injection molding (قالبگیری تزریقی). فرایند قالبگیری ماده در قالب بسته. برای گرماترورها قالب نسبتاً سرد است. برای گرماسختها قالب در دمای کوری آن پلاستیک نگه داشته می‌شود.

Insulator (عایق). غیر رسانای (الف) الکتریکی یا (ب) انرژی گرمایی؛ در هر دو صورت عایق مقاومت ویژه الکتریکی قابل توجهی ندارد. ماده‌ای بسا بانسد ظرفیتی پر و شکاف انرژی زیاد.

Interactive properties (خواص متقابل). خواص حاصل از رفتار متقابل دو یا چند فاز.

Intermetallic phase (فاز بین فلزی). ترکیب دوفلز.
 Internal structure (ساختار داخلی). ترتیب اتمها، مولکولها، بلورها و دانه‌های درون ماده.

Interplanar spacing (فضای بین صفحات). فاصله عمودی بین دو صفحه بلوری مجاور یا شاخص مشابه.

Interrupted quench (آب دادن منقطع). آب دادن دومرحله‌ای فولاد شامل گرمایش برای تشکیل استنیت و آب دادن اولیه تا دمایی بالاتر از دمای شروع تشکیل مارتنزیت و به دنبال آن سرد کردن ثانویه تا دمای اتاق.

Interstice (فضای بین نشینی). فضای اشغال نشده بین اتمها یا یونها.
 Interstitial site (n -fold) (مکانهای بین نشینی (n گانه)). فضاهای خالی بین n (۴، ۶ یا ۸) همسایه اتمی (یا یونی) نزدیک به هم.

Ion (یون). اتمی که بار دارد زیرا الکترونی به آن افزوده شده یا از آن گرفته شده است.
 Ion stuffing (چپاندن یون). تعویض یونی که نیروهای فشاری ایجاد می‌کند زیرا یونها جدید از مکان متعلق به یونها اولیه بزرگترند.

- Ion vacancy (تهیجای یون). محل اشغال نشده یون در ساختار بلوری. بار یون غایب باید به همان نسبت جبران شود.
- Ionic bond (پیوند یونی). پیوند اتمی با جاذبه کولنی یونهای غیر مشابه.
- Ionic radius (شعاع یونی). شعاع تعیین شده نیمه اختیاری برای یونها، که با عدد همسانی تغییر می کند [رجوع کنید به پیوست (ب)].
- Ionization (یونش). فرایند کاهش (یا افزایش) الکترونهاى انهای خنثی.
- Iso (هم). پیشوند نشان دهنده «تساویه».
- Isomer (ایزومر). موکولهایى با ترکیب مشابه والی ساختار متفاوت.
- Isotactic (polymers) (پلی مرهای) تک آرایش). تکرار پردامنه در زنجیر پلی مر (در مقایسه با بی آرایش).
- Isostatic molding (قالبگیری ایزواستاتیک). فشرده کردن گرد برای به دست آوردن شکل مطلوب، با استفاده از قالب لاستیکی و سیال هیدرولیکی (شکل ۸-۸-۱).
- Isotherm (همدم). خط دمای ثابت.
- Isothermal precipitation (رسوب همدم). تشکیل رسوب از اشباع شدن در دمای ثابت.
- Isothermal transformation (تبدیل همدم). تبدیل بر حسب زمان توسط نگه داشتن در دمای ویژه.
- Jominy distance (فاصله جاینینی). سرعت سرد کردن تعیین شده توسط آزمایش جاینینی.
- Junction (semiconductor) (پیوندگاه نیم رسانا)). مرز بین نیم رساناهای نوع n و نوع p .
- Lattice (شبکه). ترتیب فضایی مکانهای معادل در بلور.
- Lattice constants (ثابت شبکه). ابعاد سلول واحد.
- Lever rule (inverse) (قاعده اهرم عکس)). روش محاسبه برای تعیین فازها. ترکیب کلی در نقطه اتکای اهرم است.
- Light emitting diode, LED (دیود نورگسیل). وسیله پیوندی $p-n$ که برای تولید فوتونها توسط ترکیب مجدد طراحی شده است.
- Lignin (لیگنین). جزء مهم بسیاری از چوبها؛ فشرده تر از سلولز.
- Line density (چگالی خطی). تعداد اجسام مثلا اتمها در واحد طول.
- Linear polymer (پلی مر خطی). دجوع کنید به پلی مرها.
- Liquidus (خط مذاب). مرز دما که بیشتر از آن فقط مایع بایدار است.
- Lone pair (جفت الکترون تنها). الکترونها در اربیتال نامتصل s^2 .
- Long-range order (نظم پردامنه). الگوی تکراری در فواصل اتمی بسیار.
- Low-alloy steels (فولادهای کم آلیاژ). رجوع کنید به steels

Luminescence (لیانی)، نور گسیل دارنده توسط از دست دادن انرژی به صورت الکترونیهای رسانشی دوباره ترکیب شده باشکافهای الکترونی.
Macromolecules (ماکرومولکولها)، مولکولهایی که از صدها تا هزارها اتم ساخته شده اند.

Macrostructure (ماکروساختار)، شکل ساختاری با بزرگنمایی خیلی کم (یا بدون بزرگ کردن).

Magnet, permanent (hard) (مغناطیس دائمی (سخت))، مغناطیس با حاصل انرژی زیاد ($-BH$)، به طوری که در حوزه به طور منظم قرار گیرد.
Magnet, soft (مغناطیس نرم)، مغناطیسی که برای به هم زدن نظم حوزه به انرژی قابل اغماضی نیاز دارد.

Magnetic saturation (اشباع مغناطیسی)، حداکثر خاصیت مغناطیسی که می تواند در ماده ای وجود داشته باشد.

Malleable cast iron (چدن چکش خوار)، چدنی که پس از انجماد گرافیتی شدن در آن صورت می گیرد، گرافیت به صورت «خوشه ای» وجود دارد.
Martensite (مارتنزیت)، فاز مکعبی مرکز پر شبه پایدار آهن اشباع شده با کربن، که با دگرگونی برشی استیت در حین آب دادن ایجاد می شود.
Materials balance (موازنه مواد)، مواد محاسبه عددی «کل برابر مجموع اجزاء».

Matrix (زمینه)، فاز پوششی که در آن فاز دیگری قرار می گیرد.
Mean (\bar{x}) (میانگین)، مقدار متوسط (رجوع کنید به Medion).
Mean free path (میانگین مسیر آزاد)، فاصله متوسطی که توسط الکترونها یا توسط موجهای کشان همراه با انحرافها یا شکستهای طی می شود.
Mechanical properties (خواص مکانیکی)، ویژگیهای مواد در مقابل نیروهای اعمال شده از خارج.

Mechanical working (کار مکانیکی)، شکل دادن با استفاده از نیروها.
Median M (میانه)، مقدار وسط (رجوع کنید به mean).
Mer (مر)، کوچکترین واحد تکرار شونده در پلی مر.
Mesh (شبکه سرنند)، اندازه سرنند برای اندازه گیری ذرات.
Metal (فلز)، مواد تشکیل شده از عناصری که قسمتی از الکترونیهای ظرفیت خود را آزاد می کنند. (شکل ۱-۱-۲ را ببینید) از ویژگیهای این مواد رسانندگی است که در دماهای بالا کاهش می یابد. موادی با باندهای ظرفیتی نیمه پر شده.
Metallic bond (پیوند فلزی)، پیوند بین اتمی در فلزات که از ویژگیهای آن تغییر مکان الکترونها در نوارهای انرژی است.
Metallic conductor (رسانای فلزی)، ماده ای با رسانایی بیشتر از 10^{-1} m^{-1} .

- Metastability (نیمه پایداری). شرایط غیر تعادلی.
- Mho (مهو). واحد رسانش؛ عکس اهم.
- Microstructure (میکروساختار). ساختار دانه‌ها و فازها. معمولاً برای دگرگشت به بزرگنمایی نیاز دارد.
- Miller indices (hkl) (شاخصهای میلر (hkl)). شاخصی مربوط کننده صفحات به محور مرجع بلور. عکس محل تقاطع با محورها.
- Mixed particles (ذرات مخلوط). سنگ ریزه با پراکندگی اندازه.
- Mixture (مخلوط). ترکیب دو فاز.
- Mobility (μ) (تحرک). سرعت راندن (v) بار الکتریکی در واحد میدان الکتریکی، $\text{cm}^2/(\text{volt} \cdot \text{sec})$. شق دیگر آن ضریب نفوذ بار بر ولت، $\text{cm}^2/(\text{volt} \cdot \text{sec})$ است.
- Modulus of elasticity (مدول کشسانی). تنش بر واحد کرنش. (مدول یانگ معمولیترین مدول کشسانی است که با آن برخورد می‌شود).
- Modulus, bulk (مدول کشیدگی). فشار هیدروستاتیکی در واحد کرنش حجم.
- Modulus, shear (مدول برشی). تنش برشی در واحد کرنش برشی.
- Modulus, Young's (مدول یانگ). تنش محوری در واحد کرنش معمولی.
- Molding (plastics) (قالبگیری (پلاستیکها)). شکل دادن به وسیله قالب طرح دار.
- Mole (مول). جرمی مساوی با وزن مولکولی یک ماده؛ 6.02×10^{23} مولکول.
- Molecular crystal (بلور مولکولی). بلورهایی حاوی مولکولها به عنوان واحد اصلی (در مقایسه با اتمها).
- Molecular length (طول مولکولی). ریشه میانگین طولی از یک سرتاسر دیگر.
- Molecular size (اندازه مولکولی). جرم یک مولکول (بر حسب amu). یا جرم 6.02×10^{23} مولکول (بر حسب گرم).
- Molecular size (mass-average, \bar{M}_m) (اندازه مولکولی (میانگین جرمی، \bar{M}_m)). میانگین اندازه مولکولی بر اساس نسبت جرم.
- Molecular size (number-average, \bar{M}_n) (اندازه مولکولی (میانگین تعداد، \bar{M}_n)). میانگین اندازه مولکولی بر اساس نسبت تعداد.
- Molecule (مولکول). گروه محدودی از اتمها که توسط نیروهای جاذبه قوی به یکدیگر پیوند شده‌اند. پیوند بین مولکولها ضعیف است.
- Molecules, linear (مولکولهای خطی). دجوع کنید به polymer.
- Molecules, network (مولکولهای شبکه‌ای). دجوع کنید. به polymer.
- Molecules, polar (مولکولهای قطبی). مولکولهای حاوی دو قطب

الکتریکی دائمی.

Monel (مونل). آلیاژ مس و نیکل.

Monomer (مونومر). مولکولی با یک مرتبه.

Multiphase microstructure (میکروساختار چند فاز). میکروساختار

حاوی دو یا چند فاز مربوط به هم.

n -type (نوع n). نیم رسانای دارای حامل بار منفی، یعنی الکترونها.

NaCl-type structure (ساختار نوع NaCl). ترتیب fcc یونها با یونهای

با بار مخالف هم در محلهای ۶ گانه.

Nernst equation (معادله نرنست). پتانسیل الکتروود به صورت تابعی از غلظت

الکتروولیت.

Noble (نجیب). غیر فعال.

Nomenclature (AISI-SAE) (نامگذاری فولادها (AISI-SAE)).

دجوع کنید به جدول ۹-۹-۱.

Nonbridging oxygens (اکسیژنهای غیر پل ساز). اکسیژنهایی که فقط به یک

چهار وجهی SiO_4 متصل اند و بدین ترتیب چهار وجهی را متصل به هم نگه نمی دارند.

Nonmetals (غیر فلزات). در درجه اول شامل عناصری اند که در لایه

ظرفیتی خود الکترون می پذیرند یا به اشتراک می گذارند. (شکل ۱-۱-۲ را ببینید). از

ویژگیهای آن تشکیل مولکولها یا آنیونهاست.

Nonstoichiometric compound (ترکیب ناستوکیومتری). ترکیبانی

با نسبت غیر عدد صحیح اتمی (یا یونی).

Normal stresses (تنشهای عمودی). تنشهای عمود بر سطح.

Normalizing (یکنواخت کردن). گرمایش فولاد تا 500°C (~ 900°F)

به داخل گستره استنیت. به طوری که میکروساختار دانه ریز یکنواختی در آن تشکیل شود.

Notch sensitivity (حساسیت به شکاف). کاهش خواص با وجود تمرکز تنش.

Nucleation (جوانه زنی). آغاز رشد فاز جدید.

Octahedron (هشت وجهی). حجم هشت وجهی.

Orbital (اریتال). احتمالات موجی الکترونیهای اتمی و مولکولی.

Ordered crystal (بلور منظم). ساختاری با الگوی تکرار شونده پودامنه.

Orientation (polymers) (جهتگیری (پلی مرها)). فرایند کرنشی که

توسط آن مولکولها در راستای ترجیح داده شده ای قرار می گیرند.

Orthorhombic (مکعب مستطیل). بلوری با سه محور نامساوی ولی عمود بر هم.

Over-aging (فروت کردن). ادامه پیرسازی تا موقعی که نرم شدن آغاز شود.

Overt tempering (گرم کردن زیادی). گرمایش اضافی برای ایجاد به هم

آمیختگی کار بیدها (و بنابراین نرم شدن) در مارتنزیت باز پخت شده.

- Oxidation (general) (اکسایش (کلی)). افزایش سطح ظرفیتی عنصر.
- Oxidation cell (سلول اکسایش). دجوع کنید به Cell, oxidation.
- p -type (نوع p). نیمرسانای دارای حامل بار مثبت، یعنی شکاف الکترونی.
- p - n junction (پیوندگاه p - n). وسیله‌ای دارای مرز بین نیمرساناهای نوع p و نوع n ؛ دیود یکسوکننده.
- Packing factor (ضریب فشردگی). حجم حقیقی بر واحد حجم ظاهری.
- Passivation (اثر ناپذیرسازی). شرایطی که در آن از خوردگی معمولی توسط لایه جذب کننده سطحی روی الکتروود جلوگیری می‌شود.
- Pearlite (پرلیت). میکروساختار فریت و کاربید لایه‌ای با ترکیب اوتکتوئید.
- Periodic table (جدول تناوبی). شکل ۱-۱-۲ را ببینید.
- Phase (material) (فاز (ماده)). قسمتی از سیستم مواد که از نظر فیزیکی همگن است (بخش ۴-۵ را ببینید).
- Phase, transition (فاز انتقالی). فاز شبه پایداری که به عنوان مرحله‌ای میانی در واکنش تشکیل می‌شود.
- Phases, analysis of (تجزیه فازها). ترکیبات فازی که بر حسب اجزای شیمیایی بیان شده‌اند.
- Phases, quantity fraction of (کمیت کسری فازها). ترکیبات مواد که بر حسب کسر فازی بیان شده‌اند.
- Phase boundary (مرز فاز). عدم تداوم ترکیبی یا ساختاری بین دو فاز.
- Phase diagram (نمودار فازی). منحنی سطوح پایداری فاز با آنالیز و شرایط محیطی (معمولاً دما) طبق آنچه که هماهنگ شده است.
- Phase diagram, isothermal cut (برش همدمای نمودار فازی). قسمت دمای ثابت نمودار فازی.
- Phase diagram, one-phase area (ناحیه تک فاز نمودار فازی). قسمتی از نمودار فازی که در آن هم دما و هم ترکیب شیمیایی فاز قابل تغییر است.
- Phase diagram, two-phase area (ناحیه دو فاز نمودار فازی). قسمتی از نمودار فازی بعد از منحنی حد حلالیت. بنابراین فاز دومی لازم است، دما و ترکیب فازی نمی‌توانند همزمان با هم تغییر کنند.
- Phase diagram, three-phase temperature (دمای سه فازی نمودار فازی). دماهای غیر متغیری که در آن سه فاز می‌توانند در کنار هم وجود داشته باشند.
- Phenol-formaldehyde (PF) (فنل فرم آلدئید (PF)). فشرده شدن یا واکنش مرحله‌ای پلی مرفنل، C_6H_5OH و فرم آلدئید CH_2O (شکل ۷-۴-۱ را ببینید).
- Phosphorescence (فسفرسانی). لیانی که پس از برانگیخته شدن تا زمانی که دوره آن سپری شود، باقی می‌ماند.

Photoconduction (رسانش نوری). رسانش ناشی از فعالسازی الکترونها و گذشتن آنها از شکاف الکترونی توسط نور.

Photon (فوتون). کوانتوم نور.

Piezoelectric (پیزوالکتریک). مواد دی الکتریک با ساختار قرینه، به طوری که مراکز بارهای مثبت و منفی روی هم منطبق نمی شوند. در نتیجه قطبیت به فشارهایی که فاصله دوقطبی را تغییر می دهند و به قطبش حساس است.

Planar density (چگالی صفحه ای). مواردی مثل اتم در واحد سطح.

Plastic constraint (قید پلاستیکی). جلوگیری از تغییر شکل پلاستیکی در ماده نرم با حضور ماده غیر نرم مجاور.

Plastic deformation (تغییر شکل پلاستیکی). تغییر شکل دائمی ناشی از تغییر مکان اتمها (یا مولکولها) به محل جدیدی در شبکه.

Plasticizer (ماده نرم کننده). میکرومولکولهایی که به ماکرومولکولها افزوده می شوند تا تغییر شکل و انعطاف پذیری را القا کنند.

Plastics (پلاستیکها). موادی که عمدتاً حاوی مولکولهای بزرگی از عناصر یا ترکیبات غیر فلزی (رجوع کنید به polymers) صنعتی آلی قابل قالبگیری.

Point defect (نقص نقطه ای). نقص بلور شامل یک اتم (یا معدودی از اتمها).

Poisson's ratio (ν) (نسبت پواسون (ν)). نسبت (منفی) کرنش طولی

به محوری.

Polar group (گروه قطبی). دو قطبی الکتریکی ناحیه ای، در داخل مولکول

پلی مر.

Polarization (chemical) (قطبش (شیمیایی)). تقلیل واکنشگرها در

سطح کاتد، و بدین ترتیب کاهش جریان خوردگی.

Polarization (electric, \mathcal{P}) (قطبش الکتریکی). $\mu(Qd =)$ در واحد

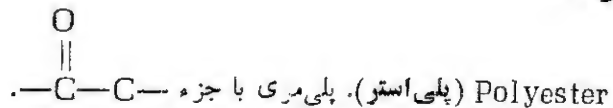
حجم.

Polarization (molecules) (قطبش (مولکولها)). تغییر مکان مراکز بارهای

مثبت و منفی.

Polycrystalline (چند بلوری). موادی با بیش از یک بلور؛ بنابراین با

مرزهای دانه.



Polyethylene (پلی اتیلن). پلی مر $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$.

Polyfunctional (چند عاملی). مولکول با سه یا چند محل که در آن امکان

واکنشهای اتصال با مولکولهای مجاور وجود دارد.

Polymer (پلی مر). ماده غیر فلزی شامل ماکرومولکولهای (بزرگ) مرکب از

- واحدهای تکرار شونده زیاد، نام فنی پلاستیکها.
- Polymer (addition) (پلیمر افزایی). پلیمری که با شکستن پیوند دوتایی و تبدیل آن به دو تک پیوند به وجود می آید در این حالت مونومر به محل فعال زنجیر بزرگ شونده متصل می شود (پلیمر شدن با واکنش زنجیری).
- Polymer (condensation) (پلیمر تراکمی). پلیمر حاصل از واکنشی که در آن مولکول کوچک دیگری نیز به عنوان محصول فرعی به وجود می آید.
- Polymer, linear (پلیمر خطی). پلیمرهای دو عاملی.
- Polymer, network (پلیمر شبکه ای). پلیمری حاوی مرهای چند عاملی که ساختار سه بعدی تشکیل می دهد.
- Polymorphism (چند شکلی). ترکیبی با بیش از یک ساختار بلوری.
- Pores, closed (منفذهای بسته). منفذهای بدون دسترسی به محیط اطراف.
- Pores, open (منفذهای باز). منفذهای به هم مرتبط.
- Porosity, apparent (تخلخل ظاهری).
$$\frac{\text{حجم منفذهای باز}}{\text{حجم کل}}$$
- Porosity, total (تخلخل کل).
$$\frac{\text{حجم منفذهای باز} + \text{حجم منفذهای بسته}}{\text{حجم کل}}$$
- Precipitation hardening (رسوب سختی). سخت کردن با تشکیل خوشه هایی قبل از رسوب (پیر سختی نیز نامیده می شود).
- Precipitation reactions (واکنشهای رسوب کردن). خروج از محلول به علت فوق اشباع شدن.
- Preferred orientation (جهتگیری ترجیحی). منظم شدن بلورها یا مولکولها به صورت غیر تصادفی.
- Pressing (ceramic) (پرس کردن (سرامیکها)). تجمع مواد دانه ای توسط فشار.
- Primary bond (پیوند اولیه). پیوندهای بین اتمی قوی ($> 200 \text{ kJ/mole}$) از نوع کووالانسی یونی، یا فلزی.
- Process anneal (steel) (فرایند تابکاری مرحله ای (فولاد)). باز پخت در نزدیکی دمای اوتکتوئید ولی زیر آن.
- Propagation (گسترش). مرحله رشد پلیمر توسط واکنش: محل واکنش پذیر مونومر به محل واکنش پذیر جدید.
- Properties (خواص). ویژگیهای کمی متناسب به مواد مثل چگالی، استحکام، رسانایی.
- Quantity fraction (phase mixtures) (کسر مقدار (مخلوط فاز)). ترکیب شیمیایی که بر حسب فازها بیان شود.

- Quartz (کوارتز). معمولترین فاز SiO_2 .
- Quench (آب دادن). سرد کردنی که توسط تعلیق در روغن یا آب جریان دار مشتاب می گیرد.
- Radiation damage (زیانهای حاصل از تشعشع). نقایص ساختاری ناشی از در معرض تابش قرار گرفتن.
- Radius ratio (r/R) (نسبت شعاعها (r/R)). نسبت شعاع یونی کاتیونها، r ، و آنیونهای همسایه، R .
- Rate (solids) (سرعت (جامدات)). دگر گونی در واحد زمان.
- Reactive site (\square) (محل واکنش پذیر (\square)). انتهای باز یک رادیكال آزاد.
- Recombination (باز ترکیب). نابودی جفتهای شکاف و الکترون.
- Recombination time (τ) (زمان باز ترکیب (τ)). به relaxation رجوع کنید.
- Recovery (بازیابی). کمبود مقاومت یا رفتارهای مشابه که در هنگام کرنش سختی به وجود می آید، توسط از بین بردن نقایص نقطه ای با باز پخت (رجوع کنید به recrystallization).
- Recrystallization (تبلور مجدد). تشکیل دانه های جدید باز پخت شده از دانه هایی که قبلا کرنش سختی شده اند.
- Recrystallization temperature (دمای تبلور مجدد). دمایی که در آن تبلور مجدد خود به خود انجام می شود.
- Rectifier (یکسو کننده). شیر یکطرفه الکتریکی که اجازه عبور جریان را به طرف جلو می دهد و از جریان عکس جلوگیری می کند.
- Reduction (احیا). جدا کردن اکسیژن از اکسید؛ پایین آوردن سطح ظرفیتی عنصر.
- Reduction of area (Red. of A) (کاهش سطح مقطع). اندازه تغییر شکل پلاستیکی در نقطه شکست.
- Reinforcement (تقویت کننده). جزء مواد چندسازه با مدول کشسان بالا و استحکام زیاد.
- Relative dielectric constant (κ) (ثابت دی الکتریک نسبی (κ)). رجوع کنید به dielectric constant.
- Relaxation (افت). از بین رفتن عامل خاصیتی.
- Relaxation time (τ) (زمان افت). زمان لازم برای از بین رفتن مقدار متناسب با نما تا ۳۷٪ که برابر است با $1/e$ مقدار اولیه.
- Residual stresses (تنشهای باقیمانده). تنشهای القاشده در نتیجه اختلافات دما یا حجم.

- Resistivity (ρ) (مقاومت ویژه). عکس رسانندگی (معمولاً بر حسب اهم-متر بیان می‌شود).
- Resistivity coefficient, solid-solution (ρ_x) (ضریب مقاومت محلول جامد (ρ_x)). مقاومت ناشی از افزایش جسم حل شونده.
- Resistivity coefficient, thermal (γ_T) (ضریب مقاومت ویژه گرمایی (γ_T)). مقاومت الکتریکی ناشی از آشفته‌گی گرمایی.
- Resolved shear stress (تنش برشی تفکیک‌شده). بردار تنش در صفحه لغزش.
- Rockwell hardness (R) (سختی راکول (R)). آزمایشی با استفاده از ساجمه؛ عمق فرو رفتگی اندازه سختی است.
- Rolling (نورد). کار مکانیکی بین دو غلتک مدور (شکل ۲-۲-۶).
- Root-mean-square length (طول ریشه میانگین مربعات). طول آماری مولکولها از یک سرتاسر دیگر.
- Rubber (لاستیک). ماده پلی‌مر با کرنش تسلیم کشان بالا.
- Rubbery plateau (ناحیه لاستیکی). برای پلاستیک، گستره دما بین دمای شیشه‌ای و دمای ذوب که مدول ویسکو کشان نسبتاً ثابتی دارد.
- Sacrificial anode (آند قربانی). فلز مصرف‌شونده‌ای که در مقابل فلزی که باید حفظ شود آندی است.
- Schmid's law (قانون اشمید). تنش محوری را به تنش برشی تفکیک‌شده مربوط می‌کند.
- Schottky defect (نقص شاتکی). جاهای خالی جفت یون.
- Scission (تجزیه تشعشی). فاسد شدن پلی‌مر توسط تشعشع.
- Secondary bond (پیوند ثانویه). پیوندهای بین اتمی ضعیف ($< 40 \text{ kJ/mole}$) ناشی از دوقطیبه‌های داخل اتمها یا مولکولها.
- Segregation (جدانشینی). ناهمگنی در ترکیب.
- Self-diffusion (خود نفوذی). نفوذ اتمها در ساختار خود.
- Semiconductor (نیمرسانا). ماده‌ای با رسانایی قابل کنترل، حد متوسط بین عایقها و رساناها.
- Semiconductor, compound (ترکیب نیمرسانا). ترکیب دو یا چند عنصر با میانگین چهار الکترون مشترک در هراتم.
- Semiconductor, defect (نیمرسانای معیوب). انتقال نااستوکیومتری اکسیدهای فلز که رسانایی خود را از یونهاى چند ظرفیتی به دست می‌آورند.
- Semiconductor, extrinsic (نیمرسانای خارجی). نیمرسانا بودن بد علت منابع ناخالصی.

- Semiconductor, intrinsic (نیمرسانای ذاتی). نیمرسانایی ماده خالص. الکترون‌ها برای عبور از شکاف انرژی برانگیخته شده‌اند.
- Semiconductor, n -type (نیمرسانای نوع n). ساخاالصیه‌ها برای نوار رسانش الکترون‌های دهنده تولید می‌کنند. این الکترون‌ها حامل‌های عمده بارند.
- Semiconductor, p -type (نیمرسانای نوع p). ساخاالصیه‌ها از نوار ظرفیتی محل‌های پذیرنده‌ای برای الکترون‌ها به وجود می‌آورند. شکاف‌های الکترون حامل عمده بار است.
- Shear strain (γ) (کرنش برشی (γ)). مماس بر زاویه برشی α که از تنش برشی به وجود می‌آید.
- Shear stress (τ) (تنش برشی (τ)). نیروی برشی بر واحد سطح.
- Shear stress, critical (تنش برشی بحرانی). حداقل تنش تفکیک‌شده برای ایجاد برش.
- Shear stress, resolved (تنش برشی تفکیک‌شده). بردار تنش در صفحه لغزش.
- Short-range order (نظم کم دامنه). ترتیب ویژه اولین همسایه‌های اتم، ولی ترتیب نامنظم در دامنه وسیع.
- Sieve series (مجموعه‌های سرنده (غربال)). یکی از چندین مجموعه استاندارد سرنده یا شبکه‌های سرنده برای تعیین توزیع اندازه ذرات.
- Silicate structures (ساختارهای سیلیکاتی). مواد حاوی چهاروجهی SiO_4 .
- Silicates, chain (سیلیکات‌های زنجیری). سیلیکات‌های پلی‌مر شده با دواکسیژن از هر چهاروجهی که با دو چهاروجهی همسایه به اشتراک گذاشته می‌شوند تا ساختار زنجیر-مانندی به وجود آورند.
- Silicates, network (شبکه سیلیکاتی). ساختار سه بعدی سیلیکات با اشتراک اکسیژن در هر چهاروجهی.
- Silicates, sheet (سیلیکات‌های صفحه‌ای). سیلیکات پلی‌مر شده با سه اکسیژن از هر چهاروجهی که به اشتراک گذاشته می‌شوند تا ساختار صفحه‌ای شکل دو بعدی مثل میکا تولید کنند.
- Silicone (سیلیس). «سیلیکات‌ها» بی بارادیکال‌های کناری آلی؛ بنا بر این سیلیس بر اساس مولکول‌های پلی‌مری تشکیل می‌شود.
- Simple cubic (مکعبی ساده). سلول واحد مکعبی با مکان‌های معادل فقط در رئوس.
- Single-phase material (ماده تک‌فاز). موادی شامل فقط یک ساختار کلی.
- Sintering (تفجوشی). تجمع توسط عوامل گرمایی.
- Sintering, liquid-phase (تفجوشی فاز مایع). تجمع با عامل مویی مایع، و نفوذ از میان مایع (که بعداً منجمد می‌شود).

Sintering, solid (تفجوشی جامد). تجمع بانفوذ جامد.
 SiO_4 tetrahedra (چهاروجهی SiO_4). واحد همسایگی چهار اکسیژن در اطراف یک اتم سیلیسیم.

Slip (ceramic processing) (خمیر) (انجام فرایند روی سرامیکها)).
 دوغاب یا مواد معلق برای ریخته گری در قالب متخلخل به شکل محصول دلخواه. قالب مایع را جذب می کند.

Slip (deformation) (لغزش) (تغییر شکل)). تغییر شکل برشی در امتداد صفحه بلور.

Slip direction (جهت لغزش). جهت بردار تغییر مکان در بلور.
 Slip plane (صفحه لغزش). صفحه بلوری که در آن لغزش صورت می گیرد.
 Slip system (سیستم لغزش). ترکیب جهت لغزش روی صفحات لغزش که تنش برشی بحرانی کمی دارد.

Slip vector (بردار لغزش). فاصله تغییر مکان نابجایی. این بردار موازی نابجایی پیچی و عمود بر نابجایی لبه ای است.

Snell's law (قانون اسنل). قانون تفرق در مرزدانه (معادله ۱-۴-۱۰).
 Soda-lime glass (شیشه سودا-آهکی). شیشه ای که بیش از همه تولید می شود، اساساً برای پنجره و مخازن شیشه ای به مصرف می رسد، شامل $\text{SiO}_2/\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ به نسبت تقریبی ۶/۱/۱ است.

Solder (لحیم). فلزی که زیر 225°C (425°F) ذوب می شود و برای اتصال به کار می رود. معمولاً آلیاژهای Pb-Sn است ولی ممکن است ماده دیگری، حتی شیشه نیز باشد.

Solid-phase reactions (واکنشهای فاز جامد). واکنشهای شامل تغییر فاز در جامد است.

Solid solution, interstitial (محلول جامد بین نشینی). بلورهای که در فضاهای خالی بین اتمهای خود جزء دیگری دارند. ساختار اصلی تغییر نمی کند.
 Solid solution, ordered (محلول جامد منظم). محلول جامد جانشینی، در حالی که هر یک از اجزاء، مکان شبکه ای ویژه ای را انتخاب می کنند.

Solid solution, substitutional (محلول جامد جانشینی). بلورهای با جزء ثانویه که در ساختار اصلی جانشین اتمهای حلال می شود.

Solidus (خط انجماد). جمیع دماهایی که کمتر از آنها فقط جامد پایدار است.
 Solubility limit (حد حلالیت). حداکثر مقدار جسم حل شدنی افزوده شده بدون فوق اشباع.

Solute (جسم حل شده). جزء کم محلول.

Solution (محلول). تک فازی شامل بیش از یک جزء.

Solution hardening (سخت کردن محلولی، محلول سختی). افزایش استحکام ناشی از ایجاد محلولهای جامد (یا با جلوگیری از حرکت نابجاییها توسط اتمهای جسم حل شدنی).

Solution treatment (محلول سختی). گرمایش برای ایجاد محلولهای جامد.

Solvent (حلال). جزء اصلی محلول.

Specific gravity (وزن مخصوص). نسبت چگالی ماده به چگالی آب.
Specific heat (گرمای ویژه). نسبت ظرفیت حرارتی ماده به ظرفیت حرارتی آب.

Spheroidite (ساختار کروی). میکروساختار کاربیدهای کروی درشت در زمینه فریت.

Spheroidization (کروی کردن). فرایند کروی کردن، معمولاً با حرارت دادن بیش از اندازه.

Spin (magnetism) (اسپین (مغناطیس)). حرکت دورانی فرضی الکترون در مدار داخل اتم.

Spinel (اسپینل). ترکیبات مکعبی $[A_m B_n X_p]$ که در آن A دو ظرفیتی و B سه ظرفیتی است. این ترکیبات معمولاً در مغناطیسهای سرامیکی و برای نسوزها به کار می روند.

Spinning (ورقکاری چرخشی). کار مکانیکی توسط سنبه برای ورق فلزی (شکل ۳-۲-۶).

Stamping (منگنه کاری). فرایند کار مکانیکی در قالب روی ورق فلزی.

Standard deviation (SD) (انحراف معیار (SD)). مقدار انحراف داده ها.

Steel (فولاد). آلیاژهای آهنی، عمدتاً حاوی کربن. در عمل کربن را می توان با عملیات گرمایی کاملاً حل کرد، از این رو درصد وزنی کربن کمتر از ۲.۰ است.

Steel, eutectoid (فولاد اوتکتوئید). فولاد با درصد کربنی که بعد از بازپختن ۱۰۰٪ پرلیت بدهد.

Steel, hypereutectoid (فولاد هیپر اوتکتوئید). فولاد با کربن بیشتر از فولاد اوتکتوئید؛ از این رو می تواند حاوی کربید پرواوتکتوئید نیز باشد.

Steel, hypoeutectoid (فولاد هیپو اوتکتوئید). فولاد با کربن کمتر از فولاد اوتکتوئید، از این رو می تواند حاوی فریت پرواوتکتوئید باشد.

Steel, low-alloy (فولاد کم آلیاژ). فولاد حاوی تا ۵٪ عناصر آلیاژی بجز کربن، تعادل فازی به نمودار Fe-C مربوط است.

Steel, plain-carbon (فولاد ساده کربنی). اساساً آلیاژهای Fe-C با حداقل مقدار آلیاژ.

- Steel, stainless (فولاد زنگ‌نزن). فولاد پرآلیاژ (معمولا شامل Cr، یا Cr+Ni) که برای مقاومت در برابر خوردگی و/یا اکسایش طراحی شده است.
- Steel, tool (فولاد ابزار). فولاد با دماهای بازپخت بالا، معمولا شامل پایدار کننده‌کار بید مثل Cr، Mn، Mo، V، W.
- Stereoisomers (ایزومرهای فضایی). ایزومرهای پیکربندی پلی‌مرها.
- Stereospecific (فضا ویژه). پیوند کووالانسی بین جفت اتمهای ویژه (در مقایسه با جاذبه‌های کولنی غیرجهت‌دار).
- Sterling Silver (نقره استرلینگ). آلیاژ ۹۲.۵ Ag و ۷.۵ Cu (این تقریباً حداکثر حلالیت مس در نقره است).
- Strain (e) (کرنش (e)). تغییر شکل توسط تنش اعمال شده.
- Strain, elastic (کرنش کشسان). تغییر شکل برگشت پذیر.
- Strain, plastic (کرنش پلاستیک). تغییر شکل دائمی به دنبال لغزش.
- Strain, true (ε) (کرنش حقیقی (ε)). کرنش پلاستیک محاسبه شده بر اساس سطح مقطع در هر لحظه.
- Strain hardening (سخت کردن کرنشی، کرنش سختی). افزایش سختی (و استحکام) ناشی از تغییر شکل پلاستیک.
- Strain point (glass) (نقطه کرنش، شیشه). دمایی که در آن ویسکوزیته، η ، شیشه برابر است با $10^{13.5}$ Pa.s (۱۰۱۴.۵ پواز).
- Strength (استحکام). مقاومت در برابر تنشهای مکانیکی.
- Strength, breaking (استحکام شکست). تنش در هنگام شکست.
- Strength, tensile (S_t) (استحکام کششی (S_t)). حداکثر بار در واحد سطح مقطع اولیه. این همان «استحکام نهایی» است که برای طراحی به کار می‌رود.
- Strength, yield (S_y) (استحکام تسلیم (S_y)). تنش لازم برای ایجاد اولین نشانه‌های تغییر شکل پلاستیک.
- Stress (s) (تنش (s)). نیرو بر واحد سطح.
- Stress concentration factor (ضریب تمرکز تنش). افزایش تنش در شکاف.
- Stress relaxation (افت تنش). از بین رفتن تنش در کرنش ثابت توسط تغییر نظم مولکولی.
- Stress relief (تنشگیری). از بین بردن تنشهای باقیمانده توسط گرمایش.
- Stress rupture (تنش-گسیختگی). گسیختگی بر حسب زمان، حاصل از تنش ثابت (معمولا در دماهای بالا).
- Structure (ساختار). ارتباط هندسی اجزای مواد.
- Supercooling (فوق سرمایش). سرد کردن تا زیر حدحلالیت بدون رسوب.

- Surface (سطح). مرز بین فاز متراکم و گاز.
- Symmetry (تقارن). ارتباط ساختاری اندازه، شکل، و موقعیت نسبی.
- System (phase diagram) (سیستم (نمودار فازی)). ترکیب اجزای تعادلی.
- System, International (سیستم بین‌المللی). استانداردهای تقریباً جهانی واحدها و ابعاد.
- Temper (hardness) (بازپخت (سختی)). گسترش کرنش سختی.
- Tempered glass (شیشه بازپخت‌شده). شیشه با تنشهای فشاری در سطح که توسط عملیات گرمایی تولید می‌شود.
- Tempered martensite (مارتنزیت بازپخت‌شده). میکروساختار فریت و کاربید که با گرمایش مارتنزیت به دست می‌آید.
- Tempering (بازپخت). فرایند نرم کردن که در آن مارتنزیت تا ایجاد میکروساختار فریت به علاوه کاربید گرما داده می‌شود.
- Termination (خاتمه واکنش). مرحله نهایی پلی‌مر کردن افزایشی. واکنش عمومی شامل اتصال محلهای فعال در سرهای رشد‌کننده دئومولکول بزرگ شونده.
- Tetragonal (crystal) (داست وجهی (بلور)). دو محور از سه محور مساوی‌اند؛ هر سه باهم زاویه قائمه می‌سازند.
- Tetrahedron (چهاروجهی). جامدی با چهاروجه.
- Texture (بافت). ساختارهای ماکروسکوپی.
- Thermal agitation (آشفته‌گی گرمایی). حرکت اتمها و مولکولها توسط گرما.
- Thermal conductivity (k) (رسانندگی گرمایی (k)). ضریب بین شار گرمایی و شیب گرمایی.
- Thermal diffusivity (h) (نفوذپذیری گرمایی (h)). ضریب نفوذ برای انرژی گرمایی، $k/\rho c_p$.
- Thermal expansion (انبساط گرمایی). انبساط به سبب افزایش نوسانات اتمی حاصل از افزایش انرژی گرمایی.
- Thermal expansion coefficient (α) (ضریب انبساط گرمایی).

$$\left(\frac{\text{تغییر در ابعاد}}{\text{تغییر دما}} \right)$$
- Thermistor (ترمستور). وسیله‌ای نیم‌رسانا بر اساس ارتباط مقاومت بالا با دما. آن را می‌توان به صورت دماسنج نیز تنظیم کرد.
- Thermocouple (ترموکوپل). وسیله اندازه‌گیری دما با استفاده از اثر ترموالکتریک سیمهای غیرمشابه.

Thermoplastic polymers (پلی‌مرهای گرمانرم). پلی‌مرهایی که در اثر گرما، نرم و قابل قالب‌گیری می‌شوند. با سرد کردن سخت، ولی در حین چرخه‌های گرمایشی بعدی بار دیگر نرم می‌شوند.

Thermosetting polymers (پلی‌مرهای گرما سخت). پلی‌مرهایی که در اثر گرمایش بیشتر پلی‌مری می‌شوند؛ بنابراین گرما موجب می‌شود مجموعه دیگری به آنها پیوندند. در اثر گرمایش بعدی نرم نمی‌شوند.

Toughness (چقرمگی). مقدار انرژی لازم برای شکست مکانیکی.

Tracheid (آوندهای ناقص). ساختار سلولی بیولوژیکی چوب.

Trans- (ترانس). پیشوندی به معنی متقاطع (عکس سپس).

Transducer (ترانسیدوسر). ماده یا وسیله‌ای که انرژی را از یک شکل به شکل دیگر تبدیل می‌کند، خصوصاً انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی یا برعکس.

Transformation temperature (دمای تبدیل). دمای تغییر فاز تعادلی.

Transistor (ترانزیستور). وسیله نیم‌رسانایی برای تقویت جریان.

Transition temperature (steels) (دمای انتقال (فولادها)). (گستره)

دمای تغییر از شکست انعطاف پذیر به شکست غیر انعطاف پذیر.

Translation (انتقال). تغییر مکان بردار بین مکانهای معادل شبکه.

Trifunctional (سه عاملی). مولکول با سه محل واکنش برای اتصال به

مولکولهای مجاور.

Ultimate strength (استحکام نهایی). دجوع کنید به tensile strength.

Unit cell (سلول واحد). حجم تکرار شونده کوچک (یا کوچکترین حجمی) که شامل الگوی کامل شبکه بلور می‌شود.

Unit mix (مخلوط واحد). نسبت سنگریزه، ماسه، و آب به سیمان پرتلند (۱ =)

در مخلوط بتن. ممکن است بر اساس وزن یا حجم معین شود.

Vacancy (تهیجای). محل پر نشده شبکه.

Valence band (باند ظرفیتی). تراز انرژی پر شده زیر شکاف انرژی. رسانش

در این باند به شکافهایی نیاز دارد.

Valence electrons (الکترونهای ظرفیتی). الکترونهایی از پوسته خارجی

اتم.

Van der Waals forces (نیروهای واندروالس). پیوند ثانویه ناشی از

قطبش ساختار.

Vinyl-type compounds (ترکیبات نوع وینیل). جدول ۷-۲-۱ را ببینید.

Viscoelasticity (ویسکوالاستیک). ترکیب جریان کشسان و رفتار کشسان.

Viscoelastic modulus (M_{ve}) (مدول ویسکوالاستیک M_{ve}). نسبت

تنش برشی به مجموع تغییر شکل کشسان، γ_e ، و جریان ویسکوز، γ_v .

- Viscosity (η) (ویسکوزیته). نسبت تنش برشی به شیب (گرادیان) سرعت.
 Viscous forming (شکل دادن ویسکوز). شکل دادن ترموپلاستیکی شیشه
 یا محصولات پلی مری.
 Vitreous (شیشه‌ای). از شیشه یا شیشه مانند.
 Volume, apparent (حجم ظاهری). حجم حقیقی به علاوه جاهای خالی
 بسته (یا حجم کل منهای حجم جاهای خالی باز).
 Volume, total (bulk) (حجم کل (حجم انباشتی)). حجم حقیقی به علاوه
 حجم جاهای خالی (هم باز و هم بسته).
 Volume, true (حجم حقیقی). حجم ذاتی ماده (بدون حجم جاهای خالی).
 Vulcanization (وولکانش). عملیاتی روی لاستیک توسط گوگرد برای
 اتصال مقاطع زنجیرهای الاستومر.
 Warpage (wood) (تاب برداشتن (چوب)). انقباض غیر یکنواخت.
 Wiedemann-franz ratio (k/σ) (نسبت وایدمان - فرانتس k/σ).
 نسبت رسانایی گرمایی به الکتریکی.
 Wood, spring (چوب بهاری). دارای دانه‌هایی با آوندهای بزرگتر و با
 فشردگی کمتر.
 Wood, summer (چوب تابستانی). دارای دانه‌هایی با سلولهای کوچکتر و
 با جداره ضخیمتر.
 Working range (glass) (گستره کار (شیشه)). گستره دما واقع در بین
 ویسکوزیته 10^{25} Pa.s تا 10^6 Pa.s.
 X-ray diffraction (تفرق اشعه X). روش تعیین فضاها بین صفحه‌ای
 بلورها.
 Yield point (نقطه تسلیم). نقطه‌ای روی منحنی تنش- کرنش بانسلیم پلاستیکی
 ناگهانی در آغاز تغییر شکل پلاستیکی (فقط در فولادهای کم کربن معمول است).
 Young's modulus (E) (مدول یا تک E). به modulus of elasticity
 رجوع کنید.
 Zener diode (دیود زنر). پیوندگاه $p-n$ با افت ولتاژ کنترل شده تحت تأثیر
 بایاس عکس.
 Zone melting (ذوب ناحیه‌ای). فرایند خالص کردن با استفاده از تجمع
 توسط انجماد جهتدار.

فهرست راهنما

- | | |
|---|--|
| <p>— چند بلورین ۲۳۷</p> <p>خواص — ۲۳۶</p> <p>مجموعه گالوانی — ۵۷۷</p> <p>آنتروپی ۳۲۸</p> <p>آند ۵۵۴، ۶۴۲</p> <p>— قربانی ۵۸، ۶۶۳</p> <p>آندی کردن ۵۷۳، ۶۴۲</p> <p>آنگستروم ۶۲۹</p> <p>آنیون ۴۹، ۸۱، ۶۴۲</p> <p>آوند ناقص ۶۱۲، ۶۶۹</p> <p>آهن دلتا ۴۳۶</p> <p>آهنربا (مغناطیس)</p> <p>— ی دائمی ۶۵۶</p> <p>— نرم ۳۸۲، ۶۵۶</p> <p>آهنرباهای سرامیکی ۳۷۹</p> <p>اتانول ۵۸</p> <p>اتصال متقاطع ۳۱۹، ۶۴۷</p> <p>اتمها ۴۵</p> <p>اتومبیل ۱۳</p> <p>اتیلن ۵۸</p> <p>اثر ناپذیرسازی ۵۷۲، ۶۵۹</p> <p>اجزاء</p> | <p>آب ۶۶، ۶۷، ۴۱۰</p> <p>آب دادن ۵۲۴، ۶۶۲</p> <p>— مارتنزیتی ۵۲۵</p> <p>— منقطع ۵۲۵، ۶۵۴</p> <p>آب دادن انتهای جامینی ۵۳۱</p> <p>آبدار کردن ۶۵۳</p> <p>آبدار کردن سیمان ۶۵۴</p> <p>آب دریا ۴۱۱</p> <p>آبکاری برقی ۵۵۳، ۶۴۹</p> <p>آب نمک ۴۱۰</p> <p>آجر ۶۴۲</p> <p>آزمایش آب دادن انتهایی ۵۳۱، ۶۵۰</p> <p>آزمایش آیزد ۴۱</p> <p>آزمایش شارپی ۲۱، ۶۴۵</p> <p>آزمایش کششی ۲۰</p> <p>آستینیت ۴۳۶، ۶۴۲</p> <p>تجزیه — ۴۴۲، ۴۷۰، ۶۴۲، ۶۴۷</p> <p>آشفته گی گرمایی ۱۶۴، ۶۶۸</p> <p>آلیاژ ۱۴۱، ۲۳۶، ۶۴۱</p> <p>انجام فرایند — ۲۴۲</p> <p>— اوتکتیک ۴۱۲</p> <p>— تجارتی ۴۲۸</p> <p>— نك فاز ۲۳۶</p> |
|---|--|

- اصل پائولی ۱۹۹، ۲۵۹
اطلاعات کیفی ۳۱
افت ۳۲۶، ۶۶۲
- تنش ۳۲۶، ۶۶۷
زمان - ۲۱۱، ۲۱۲، ۳۲۷، ۶۶۲
اکسایش ۳۳۵، ۶۵۹
اکسیژن پلساز ۳۶۶، ۳۶۸، ۶۴۴
اکسیژن غیر پلساز ۳۶۸، ۶۵۸
الاستومر ۳۲۲، ۶۴۹
الکترو
پتانسیل - ۵۵۸، ۶۴۹
الکترو د هیدروژن ۵۵۷، ۵۵۹، ۵۵۳
الکترو لیت ۵۵۳، ۶۴۹
الکترون ۴۸، ۴۹
- از جا کنده شده (آزاد) ۵۵
- رسانشی ۲۵۴، ۶۴۶
- ظرفیتی ۴۸، ۵۷، ۶۶۹
الکترون گاتیوی ۴۷، ۶۴۹
الکترون ولت ۴۸، ۴۹، ۲۵۳، ۶۲۹
الکل پروپیل ۶۲
الگوی گلوله اتمی ۷۱
الماس
ساختار - ۵۴
سختی - ۵۴
امیتر (تکسیلنده) ۲۲۴
انبساط
- بر حسب دمای ذوب ۱۶۶
- حجمی ۲۵
- خطی ۲۵، ۶۴۱
- گرمایی ۸۲، ۲۵، ۱۶۵، ۶۴۱، ۶۶۸
ضریب - ۲۵، ۶۶۸
انبساط گرمایی
- در آهن ۴۶۷
ضریب - ۲۵، ۶۶۸
- فاز ۱۶۴، ۴۵۹، ۴۱۴، ۴۲۵، ۶۴۶
احیا ۶۶۲
اختلاف ۳۳
اربیتال ۴۷، ۱۹۹، ۶۳۷، ۶۵۸
ارتعاشات اتمی ۱۶۵
ارقام بامعنی ۳۴
از جا کنده شده (آزاد) ۵۵، ۱۹۵، ۶۴۸
از دیاد طول ۱۷، ۱۸، ۶۴۹
درصد - ۱۷
اسپین (مغناطیس) ۳۸۵، ۶۶۶
اسپینل ۳۶۴، ۶۶۶
استحکام، ۱۶، ۱۷، ۲۵، ۸۲، ۶۶۷
- بر حسب مقدار کربن ۴۸۲
- بر حسب میکروساختار ۲۸۵
- تسلیم ۱۸، ۱۹، ۲۵، ۶۶۷
- دی الکتریک ۳۷۵، ۶۴۸
- شکست ۱۹، ۲۵، ۶۶۷
- کششی ۱۸، ۱۹، ۲۵، ۲۱، ۶۶۷
- بر حسب سختی ۲۱
- نهایی ۶۶۹
استحکام ضربه ای ۶۵۴
استنیت
اندازه دانه - ۵۱۷، ۵۲۱، ۶۴۲
- باقیمانده ۵۱۶
استنیتی کردن ۵۵۲، ۵۵۶، ۶۴۲
استون ۵۸
استیتات ۳۷۴
استیرن ۳۵۳
اسفالت ۶۵۷، ۶۵۸
اشباع
- پذیرنده ۲۱۷، ۶۴۱
- مغناطیسی ۳۸۵، ۶۵۶
اشعه β ۲۸۵
اصلاح کننده های ساختار مشبك ۳۶۷

- انتقال ۱۰۵
انجام فرایند ۱۲، ۱۷۹، ۲۴۲، ۳۹۲، ۴۹۹، ۵۰۷، ۵۲۲
انجماد جهندار ۴۷۸، ۶۴۸
انجمن آمریکایی آزمایش مواد (ASTM) ۱۵۷
انحراف استاندارد (SD) ۳۴، ۶۶۶
اندازه‌دانه ۱۵۶، ۱۵۷، ۲۳۷، ۲۳۸، ۶۵۳
- استتیت ۵۱۷، ۵۲۱، ۶۴۲
- ASTM ۱۵۸، ۶۲۲
- برحسب سختی ۲۷۱
اندازه ذرات ۶۰۰، ۶۰۱
اندازه فاز
آثار- ۴۸۳
اندازه مولکولی ۲۹۴، ۶۵۷
توزیع- ۲۹۶
میانگین جرمی- ۲۹۷، ۳۰۰، ۳۵۷
اندازه مولکولی میانگین تعداد ۲۹۷، ۳۰۰، ۶۵۷
انرژی
- پیوند ۵۹، ۶۰، ۷۱، ۶۴۳
- شکست ۱۶
- فعالسازی ۱۷۱، ۶۲۱
- گرمایی ۱۶۷
- ممنوع ۴۸
- نابجایی ۱۵۱
ترازهای- ۱۹۹
توزیع- ۱۶۸، ۶۵۰
چاه- ۷۱، ۶۵۰
شکاف- ۴۸، ۱۹۹، ۲۰۰، ۶۵۰
انرژی پیوند
- فرعی ۶۴، ۶۶۳
انعطاف پذیری ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۶۴۹
- برحسب دما ۲۷۵
- برحسب مقدار کرن ۴۸۳
انقباض
- چوب ۶۱۴
اوتکتوید ۴۴۰
ترکیب- ۴۴۰، ۶۵۰
تغییر مکان- ۴۴۶، ۶۵۰
دمای- ۴۴۰، ۶۵۰
فریت- ۴۴۲، ۴۴۳، ۶۵۱
فولاد- ۴۴۶، ۶۶۶
اوتکتیک ۴۱۱
آلیاژهای- ۴۱۲
ترکیب- ۴۱۱، ۶۵۰
دمای- ۴۱۱، ۶۵۰
واکنش- ۴۱۲، ۶۵۰
اورتان ۳۰۹
اوره ۵۸، ۶۴۳
ایزوپرن ۳۰۴
ایزومرهای فضایی ۳۱۲، ۶۶۷
- بار الکترون ۲۹، ۴۷، ۶۲۹، ۶۴۹
بارگذاری چرخه‌ای ۲۷۸
بازپخت ۵۲۵، ۶۶۸
- استتیتی ۵۲۶، ۶۴۲
- مارتنزیت ۵۲۵
بازیابی ۲۶۴، ۶۶۲
باتریهای خورشیدی ۳۵۱
بافت ۶۶۸
بالزا ۶۱۳
باند
- انرژی ۱۹۹، ۶۵۰
- ظرفیتی ۲۰۰، ۲۰۳، ۲۱۶، ۶۶۹
باند رسانش ۲۰۱، ۲۰۳، ۲۰۴، ۲۱۷، ۶۴۴
بتن ۵۸۷، ۵۹۹، ۶۴۲، ۶۴۶
استحکام- ۶۰۶

- بلور مکعبی ۹۳
 بلور منظم ۱۴۳، ۶۵۸
 بلورهای منشور شش بر ۹۹، ۱۱۸، ۳۵۸
 شاخه‌های - ۱۱۸
 بلورینگی ۹۱، ۶۴۷
 بلوک موتور ۵۸۹
 بتن ۵۵، ۵۸
 بونا-S ۳۰۶
 به هم آمیختگی (تجمع) ۴۸۵، ۶۴۵
 بی آرایش ۳۱۲، ۶۴۲
 Btu ۶۳۰
 بیس (پایه) ۲۲۴، ۶۴۳
 بی شکل ۱۵۹، ۶۴۲
 بی نظمی اتمی ۱۴۰
 بی نظمی در ذوب ۱۵۹
 بی نظمی مواد ۱۸۳
 بی نظمیه‌ای مولکولی ۳۱۱
 بینیت ۵۲۷
 پارافین ۲۹۶
 پاسکال ۱۷، ۶۳۱
 پتانسیل الکتروود ۵۵۸، ۶۴۹
 - محلولهای رقیق ۵۵۷
 - محلولهای مولی ۵۵۸
 پتک کاری ۲۴۳، ۶۵۲
 پخته (پختن) ۳۹۰، ۶۵۱
 پرس کردن ۶۶۱
 پرکننده ۲۸۰
 پرلیت ۴۴۲، ۴۴۳، ۴۷۶، ۶۵۹
 تشکیل - ۲۷۰
 خوردگی - ۵۶۳
 پروبیلن ۳۰۳
 پروتون ۴۷، ۲۸۰
 پلاستیکها ۷۹، ۸۰، ۲۹۲، ۲۹۴، ۳۲۱
- خودگیری - ۶۰۴، ۶۴۶
 نسبت مخلوطهای - ۶۰۵
 بردار
 - برگرز ۱۵۱، ۶۴۴
 - لغزش ۱۵۱، ۲۵۲
 برش
 - پلاستیکی ۲۴۹
 - کشسان ۲۴۵
 - همدم (نمودار فازی) ۴۱۸
 برنج ۱۴۱، ۲۳۶، ۴۱۳
 - $10^7 \beta$
 خواص فیزیکی - ۲۳۸
 خواص مکانیکی - ۲۳۸
 برون سخت سازی ۶۴۴
 برینل (BHN) ۱۸
 بسامد بر حسب ثابت دی الکتریک ۳۳۲
 بلور ۹۱، ۶۴۷
 - راست وجهی ۹۴، ۶۶۸
 - سرامیکی ۳۵۳، ۳۶۰
 - غیر مکعبی ۹۳
 - کج وجهی ۹۴
 - لوز وجهی ۹۴
 - متوازی السطوح ۹۴
 - مکعب مستطیل ۹۴، ۱۱۱
 - مکعبی ۹۳
 - منشور شش بر ۹۴
 - مولکولی (پلی مر) ۳۱۳، ۳۱۶، ۶۵۷
 جهات - ی ۱۱۰، ۶۴۷
 ساختار - ی ۹۱، ۶۳۷
 سیستمهای - ی ۹۴، ۶۴۷
 شبکه - ی ۹۲، ۶۴۷
 شکل - ی ۱۱۷، ۶۵۲
 صفحه‌های - ی ۱۱۲، ۶۴۷
 عیوب در - ۱۴۹

پیکر بندی ۶۴۶
 پیشوندهای سیستم متریک ۶۳۲
 پیل
 - اکسایشی ۵۶۷، ۶۴۵
 - ترکیبی ۵۶۲، ۶۴۵
 - تنشی ۵۶۵، ۶۴۵
 - غلظتی ۵۶۶، ۶۴۵
 - گالوانی ۵۵۵، ۵۵۶، ۶۴۵، ۶۵۲
 میکرو-ها ۵۶۴
 پیلهای گالوانی
 اجتناب از- ۵۷۶
 خلاصه‌ای از- ۵۸۲
 پیوند
 - اصلی (اولیه) ۵۱، ۶۶۱
 انرژی- ۵۹، ۶۰، ۷۱، ۶۴۳
 - بین مولکولی ۵۹
 چرخش- ۲۹۸
 - درون مولکولی ۵۹
 - شیمیایی ۴۴
 طول- ۵۹، ۶۰، ۶۳
 - فرعی (ثانویه) ۶۲، ۶۶، ۶۶۳
 - فلزی ۵۵، ۶۵۶
 - کووالانسی ۵۳، ۶۴۷
 - مخلوط ۵۷
 - یکسو کردن ۲۲۳، ۶۶۲
 - یونی ۵۱، ۶۵۵
 زاویه- ۵۹، ۶۱، ۶۲۳
 پیوند (گاه) ۲۲۲، ۶۵۵
 - $p-n$ ۲۲۲، ۶۵۹
 - کلکتور ۲۲۴، ۲۲۵
 - گسیلنده ۲۲۴
 وسایل- ی ۲۲۲
 تاب برداشتن ۶۷۰

۶۶۰
 - ی تقویت شده با رشته‌ها ۶۱۷، ۶۱۹
 ۶۵۱
 تغییر شکل ۳۲۱
 بل هیدروژنی ۶۶، ۶۵۳
 پلی آمیدها ۳۰۹
 پلی اتیلن ۲۹۶، ۳۱۵، ۶۶۰
 - باچگالی بیشتر ۳۱۵، ۶۴۳
 - باچگالی کمتر ۳۱۵، ۶۴۳
 پلی استر ۳۰۸، ۶۶۰
 پلی اورتانها ۳۰۹
 پلی مرافزایشی ۶۶۱
 پلی مرشدن
 - افزایشی ۳۰۴، ۶۴۱، ۶۶۱
 - تراکمی ۳۰۶، ۶۶۱
 درجه- ۲۹۵
 پلی مرها ۷۹، ۸۰، ۲۹۴، ۶۴۳، ۶۶۰
 پایداری- ۳۳۴
 - ی افزایشی ۳۰۴، ۶۴۱، ۶۶۱
 - ی ABS ۳۰۶
 - ی تراکمی ۳۰۶، ۶۶۱
 - ی خطی ۲۹۶، ۳۰۲، ۶۶۱
 - ی گرماسخت ۳۱۷، ۶۶۹
 - ی گرما نرم ۳۱۷، ۶۶۹
 - ی مشبك (شبكة‌ای) ۳۱۷، ۶۶۱
 تغییر شکل- ۳۲۱
 ثابت دی الکتریک- ۳۳۱
 بنه نسوز ۶۴۲
 بنتا تراکتان ۵۹
 پواز ۳۹۱، ۶۳۱
 پوسته بیرونی ۶۴۴
 پیرسختی ۵۰۷، ۶۴۱
 - و خوردگی ۵۶۵
 مکاتیس- ۵۰۹

- تابکاری ۳۶۳، ۲۶۶، ۵۰۱، ۵۰۲، ۶۴۲
 - کامل ۵۰۲
 فرایندهای - ۵۰۰، ۶۶۱
 تابکاری مرحله‌ای ۵۰۲، ۵۰۶، ۶۶۱
 تأخیر آلیاژی ۵۱۶، ۶۴۱
 تأخیر در تبدیل ۵۱۶، ۵۱۸
 تبخیر
 - گرمای - ۲۵
 تبدیل
 - همدم ۵۱۲، ۶۵۵
 تبدیل مارتنزیتی ۴۶۳
 تبلور مجدد ۲۶۲، ۴۶۳، ۵۰۲، ۶۶۲
 دماهای - ۲۶۳، ۶۶۲
 تبلور مجدد همدم ۴۶۴
 تبلور و تغییر شکل ۳۲۳، ۶۲۷
 تجزیه استنیت ۴۲۲، ۴۷۰، ۵۱۲، ۵۱۴، ۵۱۷
 تجزیه تشعشی ۳۳۵، ۶۶۳
 تجزیه شدن ۳۳۵، ۶۲۸
 تجزیه فازها ۴۲۱، ۶۵۹
 تجزیه همدم ۴۷۰، ۵۱۲
 تجمع نابجاییها ۲۷۱
 تعادل
 - شیمیایی ۴۰۸، ۶۵۰
 تحرك ۲۸، ۱۹۵، ۲۰۷، ۶۵۷
 تحرك بار ۲۰۷، ۶۵۷
 تحلیل تفرق ۱۲۳
 تخته چندان ۶۱۴
 تخلخل حقیقی ۶۰۲، ۶۶۱
 تخلخل ظاهری ۶۰۲، ۶۶۱
 تخلخل کل (انباشتی) ۶۰۲، ۶۶۱
 تراز انرژی ۴۸
 تراز پذیرنده ۲۱۶، ۶۴۱
 ترازهای دهنده
 تخلیه - ۲۱۷، ۶۲۸
 ترافز استور ۲۲۴، ۶۶۹
 ترانس ۳۱۲، ۶۶۹
 ترانسیدوسر ۳۷۷، ۶۶۹
 ترکیب
 - اوتکتوئید ۴۴۰، ۶۵۰
 - اوتکتیک ۴۱۱، ۶۵۰
 - فاز(ها) ۲۲۱
 ترکیب AX ۴۴۳
 ترکیب ناستوکیومتری ۱۴۶، ۶۵۸
 ترکیبات ۴۴۶
 $A_m X_p$ ۳۶۰، ۶۴۳
 $A_m B_n X_p$ ۳۶۳، ۶۴۱
 AX ۳۵۳، ۶۴۲
 - بین فلزی ۲۵۲، ۶۵۴
 - V-III ۲۰۷
 - چند تایی ۳۶۳
 - مکعبی با وجوه مرکزدار ۹۷، ۶۵۱
 - مکعبی ساده ۱۰۷
 - ناستوکیومتری ۱۴۷، ۶۵۸
 - نوع بوتادین ۳۰۴، ۶۲۴
 - نوع وینیل ۳۰۳، ۶۶۹
 - نیم رسانا ۲۰۶، ۲۱۸، ۳۷۵
 ترمیستور ۲۲۱، ۶۶۸
 تریدایمیت ۴۲۰
 تشعشع
 زیانهای حاصل از - ۲۷۹، ۶۶۲
 تشعشع بر حسب مقاومت ویژه ۲۸۲
 تغییرات چندشکلی ۴۶۲
 تغییر شکل ۱۷، ۶۴۷
 - پلاستیکی ۱۷، ۲۴۹، ۶۴۷
 - پلی مرها ۳۲۱
 - فلزات چند بلوری ۲۶۸
 - در دمای بالا ۲۷۲

- توان ۲۹
توزیع اندازه
مولکولی ۲۹۶
توزیع انرژی گرمایی ۱۶۷
توزیع فاز
آثار- ۳۸۵
تهیجای ۱۴۹، ۶۶۹
-جفت یونی (عیب شاتکی) ۱۵۰
-یون ۱۲۷، ۱۵۰، ۳۶۳، ۶۵۵
-دوتایی ۱۵۰
- ثابت بولتسمان ۱۶۷، ۶۲۹، ۶۴۳
ثابت پلانک ۵۷، ۶۲۹
ثابت دی الکتریک ۲۹، ۳۲۹، ۳۷۵، ۶۴۸
-بر حسب دما ۳۳۲
-نسبی ۲۹، ۳۳۰، ۶۴۸
ثابت شبکه ۹۳، ۶۵۵
ثابت گاز ۱۷۵، ۶۲۹
ثابتها
جدول- ۶۲۹
ثقل
شتاب- ۶۲۹
- جاذبه‌های
-بین اتمی ۵۱
-کولنی ۵۲
جامدات
بی نظمی اتمی در- ۱۴۰
ناخالصیهای درون- ۱۴۱
جدایش ۴۳۵، ۵۰۵، ۶۶۳
جدول تناوبی ۴۶، ۴۷
جذب ۶۴۱
جرم اتمی ۴۵، ۶۳۷
جریان ویسکوز ۳۲۳، ۳۲۵
- دردمای پایین ۲۷۲
-کشان ۱۷، ۲۲۴، ۶۴۷
-ویسکوز ۳۲۳
مرزدانه و- ۲۷۲
تفجوشی ۳۹۲، ۶۶۵
-فاز جامد ۳۹۲، ۶۶۵
-فاز مایع ۶۶۲
تفرق ۱۲۲، ۶۴۸
-اشعه ایکس ۱۲۲، ۶۷۰
تفلون ۲۹۹
تقارن ۶۶۸
تقویت رشته ۶۱۷
تقویت کننده ۳۸۸، ۶۱۷، ۶۶۲
تقویت نور ۲۲۱
تک آرایش ۳۱۲، ۶۵۵
تک بلور
تغییر شکل پلاستیکی-ها ۲۲۹
تکلیس ۶۴۲
تناوب ۴۷
تنش ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۶۶۷
پیل-ی ۵۶۵، ۶۴۵
-اسمی ۱۹، ۲۰
افت- ۶۶۷
-افزا ۳۸۷
-باقیمانده ۵۰۱، ۶۶۲
-برشی ۲۲۵، ۶۴۷، ۶۶۴
-برشی انحرافی ۲۲۹، ۶۴۲، ۶۴۷
-برشی تفکیک شده ۲۵۱، ۶۶۳
-بین سطحی ۶۱۸
-تابکاری شده ۵۰۱، ۵۰۲
-حقیقی ۱۹، ۲۰
-قائم (عمودی) ۲۴۵، ۶۵۸
-تاگیری ۵۰۱، ۶۶۷
ضریب تمرکز- ۶۶۷

- جنگالی ۸۲، ۶۳۷، ۶۴۱
 - انباشتی ۶۴۸، ۶۰۱
 - بار الکتریکی ۶۴۵، ۲۹
 - حقیقی ۶۴۸، ۶۰۳
 - خطی ۶۵۵، ۱۱۱
 - شدت جریان ۶۲۷، ۵۶۹
 - صفحه‌ای ۶۶۰، ۱۱۸
 - ظاهری ۶۴۸، ۶۰۳
 - کل ۶۰۱
 - نابینایی ۲۵۹
 چند بلورین (بلوری) ۶۶۰، ۲۶۸، ۲۳۷
 چندسو (ناهمسانگرد) ۶۱۳، ۱۶۶، ۲۶
 ۶۲۲
 چندشکلی ۶۶۱، ۱۰۲
 چندعاملی ۶۶۰، ۳۱۷
 چند فاز ۴۹۹، ۴۶۱، ۴۰۸
 چندگون ۱۰۳
 چوب ۶۱۲، ۵۸۷
 چوب
 آرد- ۴۸۱
 استحکام کششی- ۶۱۴
 انبساط گرمایی- ۶۱۳
 انقباض- ۶۱۴
 بارور کردن- ۶۱۳
 تاب برداشتن- ۶۱۴
 - بهاری ۶۷۰، ۶۱۳
 - تابستانی ۶۷۰، ۶۱۳
 دانه- ۶۱۲
 ماکروساختار- ۶۱۴
 مدول یانگ- ۶۱۴
 حاصلضرب عددی ۱۱۱
 حامل (های) بار الکتریکی ۶۴۵، ۱۹۴
 حامل بار
 جسم حل شده ۱۷۴، ۱۷۶، ۶۶۵
 جفت الکترون تنها ۶۵۵، ۶۱
 جفت الکترون و حفره ۶۴۹، ۲۱۰
 جوانه زنی ۶۵۸، ۴۶۹
 - درمرز دانه ۵۱۷
 جهات
 - بلوری ۶۴۷، ۱۱۰
 - موازی ۱۱۲، ۱۱۱
 زاویه بین- ۱۱۱
 جهات هم‌خانواده ۶۵۱، ۱۱۲
 جهت
 - لغزش ۶۶۵، ۲۴۹
 مدول کشسانی برحسب- ۲۴۶
 جهنگیری (پلی‌مرها) ۶۵۸، ۳۲۳
 - ترجیحی ۶۶۱، ۲۳۹
 - دانه‌ای ۲۳۹
 چاه انرژی ۶۵۰، ۷۱
 چدن ۶۴۲، ۶۴۱، ۵۸۹، ۵۸۷، ۴۳۹
 - انعطاف پذیر ۵۹۳
 - چکش خوار ۵۹۳
 - خاکستری ۶۴۱، ۵۹۰
 - سفید ۶۴۱، ۵۹۳
 - کروی ۵۹۳
 خواص- ۵۹۴
 چدن چکش خوار ۵۵۴، ۵۹۳، ۶۵۶
 چدن خاکستری ۵۹۱، ۵۹۰
 - فریتی ۵۹۲
 چرخه مواد ۵
 چرخه‌های کار سرد- تابکاری ۲۶۶
 چقرمگی ۶۶۹، ۲۱۰، ۱۷، ۱۶
 - برحسب شکل کاربید ۴۸۶
 - برحسب مقدار کربن ۴۸۳
 چکش خوار کردن ۵۰۳

- نابجایی ۱۵۳
 - خط انجماد ۴۱۷، ۶۶۵
 - خط ذوب ۴۱۷، ۶۵۵
 - خواص ۱۲، ۱۵، ۳۶، ۴۱، ۶۴۲، ۶۴۳
 - ارائه ۳۱
 - افزایشی ۶۴۱
 - کلی ۸۲
 - مواد ۶۲۱-۶۲۲
 - خواص فلزات تغییر شکل یافته ۲۵۷
 - خواص گرمایی ۲۵
 - خواص مکانیکی ۱۸، ۲۳۸، ۲۳۹، ۶۵۶
 - خواص مکانیکی ماده ۲۷۵
 - خوردنوذی ۶۶۳
 - خوردگی ۵۵۲، ۶۴۶
 - چگالی شدت جریان- ۵۶۹، ۶۴۷
 - حفره‌ای شدن- ۵۶۸
 - تنشی ۵۶۶
 - مرزدانه‌ای ۵۶۵
 - سرعت- ۵۶۸
 - شدت جریان- ۵۶۹، ۶۴۷
 - قطبش- ۵۷۰
 - کنترل- ۵۷۲
 - در گالوانی ۵۵۲، ۵۵۵، ۶۵۲
 - خوردگی فلزات ۵۷۹
 - داده‌های کمی ۳۲
 - دافعه الکترونی ۶۹، ۷۰، ۶۴۹
 - داکرون ۳۰۸
 - دانه
 - چوب ۶۱۲، ۶۵۲
 - در فلزات و سرامیکها ۱۵۴، ۶۵۲
 - درجه بندی ۶۵۲
 - درجه بندی اندازه‌ها ۶۰۱، ۶۵۲
 - مثبت ۲۰۷، ۱۹۴
 - منفی ۲۰۷، ۱۹۴
 - حجم
 - انباشتی ۶۰۱، ۶۷۰
 - حقیقی ۶۰۱، ۶۷۰
 - ظاهری ۶۰۱، ۶۷۰
 - کل ۶۰۱، ۶۷۰
 - حد حلالیت ۱۴۳، ۴۱۰، ۶۶۵
 - حد دوام ۲۷۷، ۶۵۰
 - پرداخت سطحی ۲۷۸
 - حرکت اتمی ۱۷۱
 - حرکت الکترون ۱۹۲
 - حرکت تصادفی ۱۷۲
 - حساسیت به شکاف ۳۸۷، ۶۵۸
 - حفاظت گالوانی ۶۵۲-۶۵۸
 - حفره الکترونی ۱۹۴، ۲۰۷، ۲۱۶، ۶۴۹
 - حفره‌ای شدن ۵۶۸
 - حفاری ۱۵۲
 - حلال ۱۷۴، ۱۷۶، ۶۶۶
 - حلبي ۵۶۳
 - حل شدن
 - واکنش- ۴۶۶
 - حوزها ۳۸۲، ۶۴۸
 - خاتمه یافتن ۳۰۴، ۶۶۷
 - خازن ۲۹، ۳۰
 - مسطح ۳۰
 - خزش ۲۷۳، ۶۴۷
 - ثابت ۲۷۲
 - سرعت- ۲۷۳، ۶۴۷
 - مکانیسمهای- ۲۷۳
 - خستگی ۲۷۶، ۶۵۱
 - خط
 - تفرق ۱۲۴

- درجهٔ پلی‌مرشدن ۶۴۸، ۲۹۵
 درون‌گرמי ۲۴
 دگرگونی
 - با سرد کردن مداوم ۵۱۸، ۶۴۶
 دما ۲۴
 انعطاف پذیری برحسب ۲۷۵
 ثابت دی‌الکتريك برحسب ۳۳۲
 - برحسب مقاومت ویژه ۱۹۶
 - برحسب نفوذپذیری ۱۷۷، ۱۷۵
 - برحسب نیم‌رسانش ۲۱۴
 -ی انتقال (انعطاف پذیر) ۲۷۵، ۶۶۹
 -ی انتقال (شیشه) ۳۱۶، ۶۵۲
 -ی اوتکتوئید ۴۴۰، ۶۵۰
 -ی اوتكتيك ۴۱۱، ۶۵۰
 -ی تبدیل ۶۶۹
 -ی تبلور مجدد ۲۶۳، ۶۶۲
 -ی جوش ۶۵
 -ی ذوب ۶۵، ۸۲
 -ی شیشه ۱۶۱، ۳۱۶، ۳۹۱، ۶۵۲
 -ی مارتنزیت ۵۱۶
 مدول کشسانی برحسب ۲۲۳، ۲۲۶
 دمای انتقال
 -تردد و انعطاف پذیر ۲۷۵، ۶۶۹
 -شیشه‌ای ۱۶۱، ۶۵۲
 دمای تبدیل ۱۰۵، ۶۶۹
 -مارتنزیت ۵۱۶
 فرایندهای ۵۲۲-۵۲۳
 دمای جوش ۶۵، ۸۲
 دمای ذوب ۶۵، ۸۲، ۶۳۷
 دمای شیشه‌ای ۱۶۱، ۶۵۲
 دمای هم‌دم‌مندی ۶۵۰
 دوران سنگ ۴
 دوران مفرغ ۲
 دوعاملی ۳۰۴، ۶۴۳
 دوقطبی ۶۵، ۳۷۶، ۶۴۸
 -القای ۶۵، ۶۵۲
 دهنده ۲۱۶
 تراز- ۲۱۶، ۶۴۸
 دی‌الکتريك
 پلی‌مر- ۳۲۹، ۶۴۸
 سراميك- ۳۷۴، ۶۴۸
 دیواره
 -حرره ۳۸۲
 دیود ۲۲۲
 -زیر (طرحواره) ۲۲۴، ۶۷۰
 -های نورگسیل ۲۲۲، ۶۵۵
 ذرات مخلوط ۶۰۲، ۶۵۷
 ذوب ۱۶۰
 گرمای- ۲۵، ۱۶۰، ۶۵۳
 ذوب ناحیه‌ای ۶۷۰
 رابطهٔ آرنیوس ۱۷۱، ۶۴۲
 رادیکال ۳۰۲
 -آزاد ۳۰۵
 راست‌وجهی ۹۴، ۴۷۱، ۶۶۸
 رخ‌برگی ۶۴۵
 رس ۳۵۰، ۶۴۵
 رسانا
 -ی فلزی ۱۹۳، ۱۹۹، ۶۵۶
 رسانش
 -نوری ۲۰۹، ۲۲۱، ۶۶۰
 رسانندگی ۱۹۶، ۲۰۳، ۶۴۶
 -الکتريكي ۲۸، ۸۳، ۶۴۹
 -فلزی ۱۹۶، ۶۵۶
 -گرمایی ۲۶، ۸۳، ۲۳۷، ۶۴۱، ۶۶۸
 طیف- ۱۹۲
 رسوب

- ۳۷۶، ۳۶۳ BaTiO_۳-
 داخلی ۱۳، ۳۶، ۵۵۲-
 ۳۶۰ CaF_۲-
 سیلیکاتی ۶۶۴-
 غیر مکعبی ۳۵۶-
 معیوب ۱۴۷، ۶۴۷-
 نوع NaCl ۹۲، ۳۵۲، ۶۴۳-
 نوع NiAs ۳۵۶-
 نوع ZnS ۳۵۶، ۶۴۳-
 نوع ZnO ۳۵۶-
 نوع CsCl ۳۵۳، ۶۴۳-
 ساختار Ax
 ۳۵۸ NiAs-
 ۶۴۳، ۳۵۲ NaCl-
 ۶۴۳، ۳۵۶ ZnS-
 ۶۴۳، ۳۵۳ CsCl-
 غیر مکعبی ۳۵۶-
 ساختار روی سولفید (ZnS) ۳۵۳، ۶۴۳-
 ساختار ZnO ۳۵۶-
 ساختار کرووی ۴۷۷، ۴۸۶، ۶۶۶-
 ساختار مشبك ۳۱۷-
 سایند (سایا) ۳۸۶، ۶۴۱-
 سختی ۱۸، ۲۰، ۲۶۵، ۵۵۳، ۵۵۳-
 القایی ۶۵۴-
 الماس ۵۴-
 بر حسب استحکام کشش ۲۱-
 بر حسب اندازه فاز ۴۸۳، ۴۸۴-
 ۴۸۵
 بر حسب رشد دانه ۲۷۱-
 بر حسب شکل کاربید ۴۸۶-
 بر حسب مقدار کربن ۲۸۲-
 برون- ۶۴۲-
 برینل (BHN) ۱۸، ۲۱، ۲۵، ۶۴۴-
 پیر- ۵۰۷، ۶۴۱-
 همدا ۱۴۶۸، ۶۵۵-
 فرایندهای- ۵۰۷
 واکنشهای- ۴۶۲، ۴۶۶، ۶۶۱-
 رسوب سختی ۵۰۷، ۶۶۱-
 رشد دانه‌ها ۲۶۹، ۴۶۲، ۶۵۳-
 رفتار دی‌الکتریکی ۲۹-
 رفتار ماده در حین کار ۱۵-
 رفتار مکانیکی ۳۸۵-
 رنگ ۵۷۶-
 روش گرانینگ ۶۴۵-
 روکشهای محافظ ۵۷۵، ۵۷۶-
 روبینه کاری ۵۷۵، ۶۵۲-
 زاویه
 پیوند ۵۹، ۶۱، ۶۴۳-
 تفرق ۱۲۳-
 زاویه بین جهات بلوری ۱۱۱-
 زمان
 افت ۲۱۱، ۲۱۲، ۳۲۷، ۶۶۲-
 باز ترکیب ۲۱۱، ۶۶۲-
 زمینه ۴۸۰، ۴۸۷، ۶۵۶-
 زنگ ۵۶۰-
 زیانهای حاصل از تشعشع ۲۷۹، ۶۶۲-
 از بین بردن- ۲۸۲، ۶۶۲-
 ذول ۶۳۱
 ساختار ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۵۴، ۶۶۷-
 AX- ۳۵۳، ۶۴۳-
 A_mX_p- ۳۶۰، ۶۴۳-
 A_mB_nX_p- ۳۶۳، ۶۴۱-
 اسپینل ۳۶۲، ۶۶۶-
 الماس ۵۴-
 بلوری ۹۱، ۶۳۷-

- تابش ۲۸۱
 -راکول ۱۸، ۲۱، ۶۶۳
 -رسوب ۵۵۷، ۶۶۱
 -عرضی ۵۳۵، ۶۵۳
 -فولاد تابکاری شده ۲۸۳
 -مارتنزیت بازپخت شده ۴۸۶، ۵۳۶
 -محلول ۲۵۴، ۶۶۵
 -مرکب ۵۱۰
 -ویکرز (DPH) ۱۸
 -شعله ۶۵۱
 -کرنش ۲۵۸، ۶۶۷
 -سختی پس از بازپخت ۵۳۶
 -سرامیکها ۸۰، ۳۴۹، ۶۴۲، ۶۴۵
 -ی پیزوالکتریک ۳۷۶، ۳۷۷، ۶۶۰
 -ی تجارتی ۲۲۸
 -رفتار الکترومغناطیسی ۳۷۲
 -رفتار مکانیکی ۳۸۵
 -فرایندهای ۳۹۰
 -سرامیکهای دی الکتریک ۳۷۲
 -سرامیکهای مغناطیسی ۳۷۹
 -سرعت (جامدات) ۴۶۵، ۶۶۲
 -سرعت بحرانی سرد کردن ۵۱۹، ۶۴۷
 -سرعت دانه ۴۶۳
 -سرعت رانش ۲۸، ۱۹۵، ۶۴۹
 -سرعت سرد کردن ۵۱۹، ۵۳۳، ۶۴۶
 -سرعت نور ۶۲۹
 -سرعت واکنش ۴۶۵
 -سرندهای تایلر ۶۰۰
 -سطح ۱۴۹، ۱۵۲، ۶۶۸
 -سطح مقطع
 -اولیه ۲۰
 -کاهش ۱۷، ۱۹، ۶۶۲
 -سطحی
 -پرداخت ۲۷۸
 سلولاز ۶۱۲، ۶۴۵
 سلول واحد ۹۲، ۶۶۹
 شکل هندسی ۱۰۴
 مکانهای ۱۰۵
 سمانتیت ۴۳۶، ۶۲۵
 سنجۀ طول ۱۷، ۲۳، ۶۵۲
 سنگریزه ۶۰۲
 سنگ گچ ۶۰۷
 سوراخ ۶۰۰، ۶۵۶
 سه‌عاملی ۶۶۹
 سیال ۱۵۹
 سیالیت ۳۹۱، ۶۵۲
 سیس ۳۱۲، ۶۴۵
 سیستم
 -بلوری ۹۳، ۶۲۷
 -فازی ۴۰۸، ۶۶۸
 -لغزش ۲۴۹، ۶۶۵
 سیستم بین‌المللی ۶۶۸
 سیستم مکعبی ۹۳، ۹۴، ۹۵
 سیستمهای فازی ۴۰۸
 Al-Si ۲۳۳
 Al-Mg ۴۳۰
 Al-Ni ۴۷۹
 Al₂O₃-SiO₂ ۴۱۸
 Al₂O₃-ZrO₂ ۴۱۷
 Al-Cu ۴۳۰
 Ag-Cu ۴۱۹
 Fe-O ۴۳۱
 FeO-MgO ۴۳۲
 Fe-C ۴۳۵، ۴۳۸، ۴۴۱، ۵۹۱
 BaTiO₃-CaTiO₃ ۴۳۲
 Pb-Sn ۴۱۰
 C-Fe ۴۳۵، ۴۳۸، ۴۴۱، ۵۹۱
 Cu-Sn ۲۲۹

- یونی ۷۱، ۶۳۷، ۶۵۵ -
 شعاعهای آوندی ۶۱۲
 شعله سختی ۶۵۱
 شفافیت ۴۸۸
 شکر ۴۱۰
 شکست
 - انعطاف پذیر ۲۷۵، ۶۴۹، ۶۵۲
 - ترد ۲۷۵، ۶۴۹، ۶۵۲
 شاخص - ۴۸۸
 شکاف انرژی در نیم رسانا (ها) ۲۰۴، ۶۵۰
 شکل ۱۱۷، ۶۵۲
 شکل دادن
 - مکانیکی ۲۴۲
 - ویسکوز ۳۹۰، ۶۷۰
 شکل دانه ۲۳۸، ۲۳۷
 شکل فاز
 آثار - ۴۸۵
 شکننده (ترد) ۱۷، ۱۹، ۶۴۲
 شیشه ۱۶۱، ۱۶۲، ۱۸۳، ۳۶۵، ۳۷۰، ۶۵۲، ۶۴۲، ۵۰۱
 پشم - ۶۴۳
 تغییرات حجمی - ۱۶۳
 دمای انتقال - ۱۶۱، ۳۱۶، ۳۹۱، ۶۵۲
 رشته - ۳۵۱
 E- ۳۷۲
 - باز پخت شده ۳۸۸، ۶۶۸
 - سودا - آهکی ۳۷۴، ۶۶۵
 - سیلیسی ۳۷۰، ۶۴۳
 کشیدن - ۳۵۱
 گستره ذوب - ۳۹۱
 - مسطح ۳۷۰، ۶۴۲
 نقطه تابکاری - ۳۹۱، ۶۴۲
 نقطه کرنش - ۳۹۱، ۶۶۷
- ۷۱ Cu-Ni- ۴۱۷
 ۲۲۸ Cu-Zn-
 سیلیس ۶۶۴
 - ذوب شده ۳۷۴، ۶۴۲
 سیلیکات ۳۶۵
 ساختاری - ۶۶۷
 - زنجیری ۶۶۴
 - صفحه ای ۶۶۴
 - های شبکه ای ۳۶۶، ۶۶۴
 سیمان آبدار ۶۰۳، ۶۴۵
 سیمان پرتلند ۶۰۳
 سیمان پلی مری ۶۰۷
 سیمان نوع I ۶۰۵
 شاخص میلر ۱۱۳، ۱۲۲، ۶۵۷
 شاخص میلر - براوه ۱۱۸
 شاخه دار شدن ۳۲۱، ۶۴۳
 شار
 - گرما ۲۶
 نفوذ - ۱۷۳، ۶۵۲
 شبکه ۹۳، ۶۵۵
 - بلوری ۹۲، ۹۵، ۶۴۷
 ثابت - ۹۳، ۶۵۵
 - مکعبی ۹۵
 - مکعبی ساده ۱۰۷
 - مکعبی مرکز دار ۱۰۵
 - مکعبی وجوه مرکز دار ۱۰۵، ۱۰۷
 شبکه براوه ۶۴۳
 شتاب نقل ۶۲۹
 شدت جریان ۶۴۷
 چگالی - ۵۶۹، ۶۴۷
 شربت ۴۱۰
 شعاع
 - اتمی ۷۱، ۷۴، ۶۳۷، ۶۴۲

عاملهای هواده ۶۰۶	- ویکور ۶۲۳
عاملی ۳۰۴: ۶۵۴	شیشه‌ای ۶۷۰
چند- ۳۱۷، ۶۶۰	صفحه‌ها
چهار- ۳۱۹	- ی بلوری ۱۱۴، ۶۴۷
دو- ۳۰۴، ۶۴۳	- ی لغزش ۲۲۹، ۶۶۵
سه- ۶۶۹	محل تقاطع- ۱۱۶
عدد آواگادرو ۴۵، ۶۲۹، ۶۴۲	- ی موازی ۱۱۷
عدد اتمی ۴۵، ۴۷، ۶۳۷، ۶۴۲	- ی هم‌خانواده ۱۱۷، ۶۵۱
عدد SAE ۴۴۷	صورت‌بندی ۲۹۹، ۶۴۶
عدد اندازه‌دانه ۱۵۷، ۶۴۲، ۶۵۳	ضد‌زنگی ۵۷۶
عدد سوراخ ۶۰۰، ۶۶۴	ضرایب تبدیل
عدد کوئوردیناسیون ۷۵، ۶۴۶	جدول- ۶۲۹، ۶۳۰، ۶۳۱
- برحسب نسبت شعاع (r/R) ۷۷	ضرایب افت ۳۷۵
عرضی	ضرایب انبساط حجمی ۲۵
سختی- ۵۳۵، ۶۵۳	ضرایب انبساط طولی ۲۵
عمل حل‌شدن ۴۶۷، ۵۰۷، ۶۶۶	ضرایب فشردگی ۹۵، ۹۶، ۶۴۲، ۶۵۹
عملیات گرمایی ۶۴۶	ضریب فشردگی اتمی ۹۷، ۶۴۲
عناصر	ضریب مقاومت ویژه
جدول- ۶۳۷	- گرمایی ۱۹۷، ۶۶۳
خواص- ۶۳۷	- محلول ۴۱۶
- غیر فلزی ۴۶، ۸۰	طراحی قطعه ۶۴۶
- فلزی ۴۶	طول
عناصر آلیاژی ۱۴۱، ۲۳۶، ۶۴۱	- پیوند ۶۰، ۶۴۳
عیب	- ریشه‌میانگین مربعات ۲۹۸، ۶۶۳
- خطی ۱۴۹، ۱۵۰	طول مولکولی ۲۹۶، ۲۹۸، ۶۵۷
- شانکی ۱۵۰، ۶۶۳	ظرفیت ۴۸، ۶۳۷
- فرنکل ۱۵۰، ۶۵۲	ظرفیت خازن ۳۰
- نقطه‌ای ۱۴۹، ۶۶۰	ظرفیت گرمایی ۲۴، ۴۸۹، ۶۵۳
عیوب ۱۴۹، ۱۸۳	ظرفیت لرزه میرایی ۵۹۱، ۶۴۷
غیر فلزات ۴۶، ۶۵۸	ظرفیت (نفوذپذیری) ۳۳۱، ۶۲۹
فازاده ۵۵۳، ۶۵۱	
فازها (مواد) ۱۶۴، ۱۴۲، ۴۱۳، ۴۲۵، ۶۵۹	

- اندازه- ۶۵۷، ۲۷۵
تجزیه- ۶۵۹، ۴۲۱
ترکیب- ۲۲۱
ی انتقالی ۶۵۹، ۴۷۱
ی بین فلزی ۶۵۲، ۳۸۵، ۲۵۴
ی پراکنده ۶۴۸، ۴۸۵، ۴۷۶، ۴۷۵
ی مولکولی ۲۹۲
کسر مقدار- ۶۵۹، ۴۸۵، ۴۲۵
فاصله جامینی ۶۵۵
فرایندها
ی تابکاری ۵۰۰
ی تبدیل ۵۲۵، ۵۲۴، ۵۲۳
ی تفجوشی ۶۶۲، ۳۹۲
ی رسوب سختی ۶۶۱، ۵۰۷
ی فولاد تجارتي ۵۲۲
ی گرمایی ۴۹۹
ی نفوذ ۱۷۹
ی یکنواخت کردن ۶۵۸، ۵۰۴
فرایندهای تفجوشی ۳۹۲
فروت شدن ۶۵۸، ۵۰۹
فرم آلدهید ۵۸
فرو اسپینل ۳۸۱، ۳۶۴
فروالکتريک ۶۵۱
فرومغناطیسی ۶۵۱
فریت
سرامیکهای- ۶۵۱، ۳۸۵، ۳۶۲
پرواوتکتوید ۶۵۱، ۴۴۳، ۴۴۲
آهن مکعبی مرکز پر ۶۵۱، ۴۳۶
اوتکتوید ۶۵۱، ۴۴۳، ۴۴۲
فسفر ۲۱۵، ۲۱۴، ۲۱۲
فسفرسانی ۶۵۹، ۲۱۵
فشارسنج ۲۲۱
فشارکاری ۶۵۱، ۲۴۳
فشار هیدروستاتیکی ۲۴۶
- فشردگی ۶۰۳، ۶۰۱، ۹۶، ۹۵
فشردگی مخلوط ۶۰۳
فشرده
منشور شش بر- ۶۵۳، ۱۰۰
فضاویژه ۶۶۷، ۵۴
فضای آزاد ۳۱۶
فعالسازی نوری ۲۰۹
فلدسپار ۳۶۷
فلزات ۶۵۶، ۶۴۱، ۱۸۳، ۷۹، ۴۶
خواص- ۲۵۷
خوردگی- ۵۵۲
رسانندگی- ۶۴۶-۲۳۷
رشد دانه ها در- ۶۵۳، ۲۶۹
سردکاری- ۶۴۶، ۵۰۲، ۲۶۵
سیستمهای لغزش در- ۲۵۶، ۲۴۹، ۶۶۵
تک فاز- ۶۶۴، ۲۳۶
چند بلوری ۶۶۰، ۲۶۸
ریزدانه ۲۷۲
مایعات ۱۵۹
مکعبی با وجوه مرکز دار ۹۶
مکعبی مرکز دار ۹۵
گرمای ذوب- ۱۶۰
گرمکاری- ۶۵۳، ۲۶۵
محلولهای جامد در- ۱۴۲
فلزات گرد شده ۳۹۲، ۳۹۲
فلوئورسانی ۶۵۲، ۲۱۵
قل- فرم آلدهید ۶۵۹، ۶۴۳، ۳۱۷
فواصل
بین اتمی ۶۸
بین صفحه ای ۶۵۲، ۱۲۲
بین صفحه ای d ۱۲۲
قوتون ۶۶۰، ۲۱۰، ۲۰۹
فوق سرمایش ۶۶۷، ۱۶۳

- فولاد ۴۳۹، ۶۳۱، ۶۴۲، ۶۶۶
 فرایندهای تبدیل در - ۵۲۳
 AISI-SAE ۴۴۷، ۶۴۱
 - ایزار ۵۳۷، ۶۶۷
 HSLA ۵۱۰
 - اوتکتوئید ۴۲۶، ۵۱۲، ۶۶۶
 - پرلیتی ۲۸۴
 - تندیر ۵۳۷، ۶۵۳
 XX ۴۰، ۴۴۷، ۵۴۱
 - درشت دانه ۵۱۷
 - ریزدانه ۵۱۶، ۵۱۷
 - زنگ زن ۷۹، ۵۷۶، ۶۴۲، ۶۶۷
 - کرین دهی شده ۱۸۰، ۶۴۴
 - کرینی ۴۴۷، ۶۴۴
 - کم آلیاژ ۴۴۶، ۵۱۸، ۶۶۶
 - ۱۰۴۵ ۴۴۶، ۵۱۵، ۵۱۶
 - ۱۰۸۰ ۴۴۶، ۵۱۳، ۶۴۲
 - هیپراوتکتوئید ۴۴۱، ۴۴۶، ۶۶۶
 - هیپراوتکتوئید ۴۴۶، ۶۶۶
 نامگذاری - ۴۴۶، ۶۵۸
 فولادهای کم آلیاژ و پراستحکام (HSLA)
 ۵۱۰
 فیبر ۶۱۴
 قاعده مخلوطی ۴۷۶، ۴۹۰
 قالبگیری ۶۵۷
 - تزریقی ۶۵۴
 قانون اسنل ۴۸۸، ۶۶۵
 قانون اشمید ۲۵۱، ۶۶۳
 قانون اول فیک ۱۷۳، ۶۵۱
 قانون (قاعده) اهرم (معکوس) ۴۲۶، ۶۵۵
 قانون براگ ۱۲۳
 قانون دوم فیک ۱۷۳
 قطبش
- الکتریکی ۳۳۰، ۶۶۰
 - شیمیایی ۵۷۰، ۶۶۰
 - کاندی ۵۷۰
 - مولکولها ۳۳۳، ۶۶۰
 قطبیت ۶۶
 قطعات فازی در بدن ۵۵۳
 قطعه ریختگی ۲۴۲، ۶۴۴
 قلع خاکستری ۲۰۵
 قید پلاستیکی ۴۸۰، ۶۶۰
 کاتالیزور ۶۴۴
 کاتد ۵۵۴، ۶۴۴
 واکنش - ی ۵۶۰، ۶۴۴
 کاتیون ۴۷، ۴۸، ۸۱، ۶۴۴
 کار
 - سرد (سردکاری) ۲۵۸، ۲۶۵، ۲۶۶
 - گرم (گرمکاری) ۲۶۵، ۶۵۳
 - مکانیکی ۲۴۲، ۲۴۳، ۶۵۶
 کاربید ۴۳۶، ۴۴۲، ۶۴۴
 - اوتکتوئید ۴۴۵
 - پر اوتکتوئید ۴۴۴
 کار سرد
 - بر حسب خواص ۲۶۰، ۲۶۱
 کار مکانیکی
 - اولیه ۲۴۳
 - ثانویه ۲۴۴
 کاغذ ۶۱۵
 کالری ۶۳۰
 کاهش سطح مقطع ۱۷، ۱۸، ۶۶۲
 کج وجهی ۹۴
 کرین باز پخت شده ۵۹۶
 کرینی شدن ۳۳۵
 کرینی کردن ۱۷۹، ۵۴۱، ۶۴۴
 کریستو با لیت ۳۶۷

- خوشه‌ای ۵۹۶
 - کروی ۵۹۳
 گرافیتی کردن ۵۹۰، ۶۵۳
 گرماسخت ۳۱۸، ۶۶۹
 گرمانرم ۳۱۸، ۶۶۹
 گرمای تبخیر، ۲۵
 گرمای حاصل از آبدار کردن ۶۰۴
 گرمای ذوب ۲۵، ۱۶۰، ۶۵۳
 گرمای ویژه ۲۵، ۶۶۶
 گرمکاری ۲۶۵، ۶۵۳
 گرم کردن زیادی ۴۸۵، ۶۵۸
 گروه قطبی ۳۱۲، ۶۶۰
 گسترش یافته ۳۰۴، ۶۶۱
 گستره انجماد ۴۱۷
 گستره کار (شیشه) ۳۹۱، ۶۷۰
 تنش گسیختگی ۲۷۴، ۶۶۷
 گشتاور الکترون ۳۸۰، ۶۲۹
 گشتاور دو قطبی ۶۷، ۶۲۸
 گوتاپر شا ۳۱۲
 لحیم ۴۱۲، ۶۶۵
 لحیمکاری سخت ۶۲۳
 لعاب ۵۷۵
 لغزش ۲۲۹، ۶۶۵
 بردار- ۱۵۱، ۲۵۲، ۶۶۵
 جهت- ۲۲۹، ۶۶۵
 سیستم- ۲۲۹، ۶۶۵
 صفحه- ۲۲۹، ۶۶۵
 مکانیسم- ۲۵۱
 لاستیک ۳۱۲، ۶۲۳، ۶۶۳
 -بونا-S- ۳۰۶
 -ترکیبی ۳۰۶، ۶۴۲
 -طبیعی ۳۱۲، ۶۴۳
 وولکانش- ۳۱۹، ۶۷۰
 کرنش ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۶۶۷
 -برشی ۲۴۵، ۶۶۲
 -پلاستیکی ۱۷، ۶۶۷
 -حقیقی ۱۹، ۲۲، ۶۶۷
 -دائمی ۱۶، ۱۷
 -کشسان ۱۷، ۶۴۹، ۶۶۷
 کرنش برشی کشان ۲۴۵، ۶۶۲
 کرنش سختی ۲۵۸، ۶۶۷
 کرنش قائم ۲۲۲
 کروی کردن ۵۰۲، ۶۶۶
 کره‌های گرافیتی ۵۹۳
 کسر مقدار ۶۶۱
 کشسانی ۱۷، ۲۲۲
 -بر حسب جهت ۲۴۶
 -بر حسب دما ۲۴۶، ۳۲۶
 مدول- ۱۷، ۸۲، ۲۴۲، ۲۴۷، ۳۲۲، ۶۴۱، ۶۴۲، ۶۵۷
 کشش سخت ۶۵۳
 کشیدن ۲۲۳، ۶۴۹
 کلروپرن ۳۰۴
 کالکتور (گردآور) ۲۲۲، ۶۴۶
 کلونخه (مصالح دانه بندی شده) ۵۹۹، ۶۴۱
 کوارتز ۳۶۶، ۶۴۳، ۶۶۲
 کوپلی مر ۳۰۵، ۶۲۴
 گاز
 دمای جوش- ۶۵
 دمای ذوب- ۶۵
 -نچسب ۶۴، ۶۵۸
 گچ پاریس ۶۰۷
 گرادیانهای غلظت ۱۷۳
 گرافیت ۵۶، ۱۶۶
 پوسته‌های- ی ۵۹۰، ۵۹۲
 کره‌های- ی ۵۹۳

- لوز وجهی ۹۲
لیانی ۲۱۱، ۶۵۶
لیانی الکتریکی ۲۱۱
لیانی شیمیایی ۲۱۱
لیانی نوری ۲۱۱
لیگنم و بنای ۶۱۳
لیگنین ۶۵۵
- ماتی ۴۸۸
ماده فشرده ۶۴۶
ماده نرم کننده ۶۶۰
مارتنزیت ۴۷۰، ۶۵۶
دمای- ۵۱۶
مارتنزیت بازپخت شده ۲۷۲، ۴۸۶، ۶۶۸
سختی- ۴۸۶
ماسه ۵۹۹
رودخانه ۶۰۱
ساحلی ۶۰۱
ماشین حساب الکترونیکی ۱۴
ماشینکاری ۲۶۷
ماکروساختار ۶۵۶
چوب ۶۱۴
ماکرو مولکول ۸۰، ۲۹۲، ۶۵۶
ماگنتیت ۳۸۰
مایعات ۱۵۹
مایعات فوق سرد شده ۱۶۳
متان ۶۱
متانول ۵۸
متوازی السطوح ۹۴
متوسط ۳۳
متوقف کننده های نوری ۲۲۳
مجموعه سرند ۶۰۰، ۶۶۴
مجموعه گالوانی ۵۵۸، ۵۷۷
محصول فرعی ۳۰۶
- محل واکنش پذیر ۳۰۴، ۶۶۲
محلول ۱۶۴، ۴۰۹، ۴۶۲، ۶۶۵
- جامد ۱۲۸، ۶۶۵
محلول جامد ۱۲۲، ۶۶۵
حرکت های نابجایی در- ۲۵۴
- بین نشینی ۱۲۳، ۶۶۵
- ترکیبات یونی ۳۶۴
- جانشینی ۱۴۲، ۶۶۵
- فلزی ۱۴۲
مقاومت ویژه- ۱۹۷، ۶۶۳
محلول جامد جانشینی ۱۴۲، ۶۶۵
- تصادفی ۱۴۳
- منظم ۱۴۳، ۱۴۴
محلول جامد منظم ۱۴۳، ۶۶۵
محور بلورها ۹۳، ۹۴، ۶۴۳
مخلوط ۱۴۱، ۱۶۴، ۲۰۹، ۶۵۷
مخلوط واحد ۶۰۵، ۶۶۹
مدول
- برشی ۲۴۵، ۶۵۷
- صلابت ۲۴۵
- کشسانی ۱۷، ۸۲، ۲۴۴، ۲۴۷
۶۴۱، ۶۵۷
- کشیدگی ۲۴۶، ۶۵۷
- ویسکوالاستیک ۳۲۵، ۶۶۹
- یانگ (کشسانی) ۱۷، ۸۲، ۲۴۴
۲۴۷، ۶۵۷
مر ۸۰، ۲۹۵، ۶۵۶
جرم- ۲۹۵
مرز ۱۴۹، ۶۴۳
مرزدانه ۱۵۳، ۶۵۲
جوانه زنی در- ۵۱۷
خوردگی- ای ۵۶۵
- و تغییر شکل ۲۷۲
مساحت- ۱۵۶، ۶۵۲

ی- C ۴۶۸، ۵۱۲، ۵۱۶
 منحنیهای سختی پذیری ۵۳۱، ۵۳۳
 استفاده از- ۵۳۵
 منشور شش بر ۹۴، ۹۹
 - ساده ۱۰۰
 - فشرده ۱۰۰، ۶۵۳
 منقذهای باز ۶۰۱، ۶۰۱
 منقذهای بسته ۶۰۱، ۶۰۱
 منگنه کاری ۲۴۳، ۶۶۶
 مقاومت ویژه ۲۸، ۱۹۵، ۶۶۳
 - بر حسب دما ۱۹۶، ۶۶۳
 - در محلولهای جامد ۱۹۷، ۶۶۳
 - بی نظمی- ۱۸۳
 مواد
 - تقویت شده ۳۸۸، ۶۱۷
 - تک فاز ۲۳۶، ۶۲۲
 - چندسازه ۵۸۷، ۶۱۷، ۶۴۶
 خواص- ۴۸۰، ۶۳۲، ۶۴۳
 درشت دانه ۱۵۶، ۲۷۲، ۵۱۷
 ریز دانه ۱۵۶، ۲۷۲، ۵۱۶
 - سرامیکی ۳۴۹، ۶۴۵
 - غیر بلوری ۱۵۹
 - همجوش ۶۴۱
 مواد بازیابی شده ۶
 مواد چند فاز ۴۰۸، ۴۶۱، ۲۹۹
 مواد مرکب
 - استوکیومتری ۱۴۷
 محلولهای جامد در- ۱۴۶
 مواد مهندسی ۶۴۱-۶۴۲
 موازنه مواد ۴۲۵، ۶۵۶
 موتور ۱۳
 موریس کوهن ۴
 مول ۶۵۷
 مولکولها ۵۸، ۶۵۷

مرز فاز ۱۶۴، ۶۵۹
 مشخصات گرمایی ۲۴
 معادله ترنست ۵۶۶، ۶۵۸
 مفرغ ۲۳۶، ۶۴۱، ۶۴۲
 مقاومت ۲۸
 مقاومت ویژه
 - الکتریکی ۲۸، ۱۹۳، ۱۹۴، ۶۴۱
 ۶۴۹
 - بر حسب تشعشع ۲۸۲
 مقدار فاز ۴۷۶
 مقدار کربن
 - بر حسب استحکام ۲۸۲
 - بر حسب انعطاف پذیری ۴۸۳
 - بر حسب چقرمگی ۴۸۳
 - بر حسب سختی ۴۸۲، ۵۳۱
 مکان
 - های معادل ۱۰۶، ۶۵۰
 - های بین نشینی ۳۵۳، ۶۵۲
 - های ۴ گانه ۳۵۶
 - های ۶ گانه ۳۵۴
 - های ۸ گانه ۳۵۳
 - های سلول واحد ۱۰۵
 مکعب با وجوه مرکزدار ۹۶، ۶۵۱
 ترکیبات- ۹۷
 فلزات- ۹۶
 مکعب ساده ۱۰۷، ۶۶۴
 مکعب فشرده ۹۸
 مکعب مرکزدار (bcc) ۹۵، ۱۰۵، ۶۲۳
 مکعب مستطیل ۹۲، ۱۱۱، ۶۵۸
 مگنتون بوهر ۳۸۰، ۶۴۳
 ممانت فضایی ۳۱۷
 منحنی S-N ۲۷۷
 منحنیها
 ی- T-T-T ۵۱۲

- نامگذاری فولادهای AISI-SAE ۶۴۱
 تایلون ۳۰۸، ۳۱۰، ۶۴۴
 نجیب ۵۵۸، ۶۵۸
 نسبت بواسون ۲۴۵، ۶۶۰
 نسبت (c/a) ۱۰۱
 نسبت شعاع ۷۱، ۶۶۲
 - بر حسب عدد کوئوردیناسیون ۷۷، ۶۴۶
 نسبت ویدمان-فرانتس ۲۳۷، ۶۷۰
 نظام ۱۴۳
 - اتمی ۹۰
 - پرداخته ۹۱، ۶۵۵
 - کم‌دانه ۳۶۸، ۶۶۴
 نفوذ ۱۷۱، ۱۷۳، ۶۴۸
 خودی ۶۶۳
 ضریب- ۱۷۳
 فرایندهای- ۱۷۹
 مکانیسمهای- ۱۷۲
 - اتمی ۱۷۱
 - بر حسب دما ۱۷۵، ۱۷۰
 - شار ۱۷۳، ۶۵۲
 نفوذپذیری ۱۷۲، ۶۴۸
 - اتمی ۱۷۲، ۶۴۸
 - بر حسب دما ۱۷۵، ۱۷۰
 - گرمایی ۶۶۸
 نقره استرلینگ ۱۴۱، ۴۱۳، ۶۴۱، ۶۶۷
 نقطه تابکاری ۳۹۱، ۵۰۱، ۶۴۲
 نقطه تسلیم ۱۹، ۲۰، ۶۷۰
 نقطه ذوب ۱۵۹
 نقطه شیشه‌ای ۳۱۶
 نقطه کرنش ۳۹۱، ۶۶۷
 نقطه کوری ۳۷۶
 - مقناطیسی ۶۴۷
 نمایش طرحوار ۳۲
- ماکرو- ۸۰، ۲۹۴، ۶۵۶
 -ی بزرگ ۲۹۳
 -ی خطی ۲۹۶، ۳۰۲، ۶۶۱
 -ی DNA ۶۲۱
 -ی شبکه‌ای (مشبك) ۳۱۷، ۶۵۷
 -ی قطبی ۶۶، ۶۵۷
 -ی نوع بوتادین ۳۰۴
 -ی نوع وینیل ۳۰۳، ۶۶۹
 مومها ۲۹۴
 مونل ۶۴۱، ۶۵۸
 مونومر ۶۳، ۶۵۸
 مهر ۶۵۷
 میانگین ۳۳، ۶۵۶
 میانگین تعداد (عددی) ۲۹۷، ۳۰۰، ۶۵۷
 میانگین مسیر آزاد ۱۹۶، ۶۵۶
 میانگین وزنی اندازه‌مولکولی ۲۹۶، ۶۵۷
 میانه ۳۳، ۶۵۶
 میدان الکتریکی ۲۸، ۱۹۵، ۶۴۹
 میکروساختار ۲۳۷، ۴۶۱، ۶۵۷
 - بر حسب استحکام ۴۸۵
 - چندبلورین ۲۳۷، ۶۵۸
 - چند فاز ۴۶۱، ۶۵۸
 میلار ۳۰۸
- تأبجایی ۱۵۱، ۲۵۲
 حرکتهای- ۲۵۴
 لغزش- ۲۵۳
 - لبه‌ای ۱۵۱، ۲۵۲، ۶۴۸
 تأبجایی پیچی ۱۵۱، ۶۴۸
 ناحیه ۶۷۰
 ناحیه لاستیکی ۳۲۵، ۶۶۳
 ناخالصیها ۱۸۳
 نامگذاری AISI-SAE ۴۴۶، ۴۴۷، ۶۵۸

- نمک طعام (NaCl) ۹۱
 نمودار
 - تنش- کرنش ۱۸، ۱۹، ۲۱
 - فازي ۴۰۸، ۴۱۶، ۶۵۹
 نمودار I-T-۵۱۲
 نمودار تعادلي ۴۱۶، ۶۵۵
 نمودار حلايت ۴۱۵
 نمودار فازي ۴۰۸، ۴۱۶، ۶۵۹
 برش همدماي-۴۱۸، ۶۵۹
 دماي سه فازي- ۴۲۲، ۴۲۶، ۶۵۹
 ناحیه تک فاز- ۴۲۱، ۴۲۴، ۶۵۹
 ناحیه دو فاز- ۴۲۲، ۴۲۴، ۶۵۹
 نوترون ۲۸۵
 بر خورد-ها ۲۸۵
 سرعت-۶۲۹
 نورد ۲۴۳، ۶۶۳
 نوع ~ ۶۵۸
 نوع p ۲۱۶، ۶۵۹
 نیروی پسماندزا
 -ی الکتریکی ۶۴۵
 -ی مغناطیسی ۶۴۵
 نیروها
 -ی دافعه ۷۵
 -ی کولنی ۶۹، ۷۳، ۶۴۶
 -ی واندروالسی ۶۴، ۶۶۹
 نیروهای پیوندی ۵۱
 -اصلي (اولیه) ۵۱، ۶۶۱
 نیمرسانا ۱۹۳، ۶۶۳
 ترکیبات- ۲۵۶، ۲۱۸، ۳۷۵، ۶۶۳
 خواص- ۲۵۸
 شکاف انرژی در- ۲۵۴، ۶۵۵
 -ی خارجی ۲۱۵، ۶۶۳
 -ی ذاتی ۲۵۴، ۶۶۴
 -ی سرامیکی ۳۷۵
- ی معیوب ۲۱۸، ۶۶۳
 -ی نوع N ۲۱۵، ۶۶۲
 -ی نوع p، ۲۱۶، ۶۶۴
 نیمرسانش بر حسب دما ۲۱۴
 نیمه عمر ۲۸۵
 نیمه پایداری ۴۷۱، ۶۵۷
 نئوپان ۶۱۴
 نیوتن ۱۸، ۲۲، ۲۳، ۶۳۱
 واحد جرم ۴۵، ۶۲۹، ۶۴۲
 واحد جرم اتمی ۴۵، ۶۲۹، ۶۴۲
 واکنش
 -اوتکتوید ۴۴۵، ۶۵۵
 -اوتکتیک ۴۱۲، ۴۶۹، ۶۵۵
 -چندشکلی ۴۶۶
 -حل شدن (محلول) ۴۶۶
 -رسوب کردن ۴۶۶، ۶۶۱
 -فاز جامد ۶۶۵
 -کاتدی ۵۶۵
 -همدما ۴۶۵، ۴۶۸، ۵۱۲
 واکنشگر
 -آب جوش ۷
 واکنشگر هسته‌ای ۷
 ورقکاری چرخشی ۲۴۳، ۶۶۶
 وزن اتمی ۴۴۲
 وزن مخصوصی ۶۶۶
 وسایل
 -پیوند ۲۲۲
 -تقویت نور ۲۲۱
 -حساس نور ۲۲۱
 -رسانش ۲۲۱
 -مقاومت ۲۲۱
 -نیمرسانا ۲۲۱
 ولتاژ مؤثر ۵۸۱، ۵۵۴

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| همدوسی ۵۰۹ | وولکانش ۳۱۹، ۶۷۰ |
| همسو ۱۶۰۶، ۲۲۶ | ویسکوزیته ۳۲۳، ۶۷۰ |
| همگن کردن ۵۰۵ | ویسکوالاستیک ۳۲۵، ۶۶۹ |
| هم محور ۲۳۸، ۶۵۰ | ویکور ۶۲۳ |
| هیپراوتکتوید | وینیل کلرید ۵۸ |
| فولاد-- ۴۴۱، ۴۴۶، ۶۶۶ | وینیلیدن ۳۰۳ |
| هیدروپلاستیکی ۶۵۳ | |
| | هشت وجهی ۶۵۸ |
| یکسو کننده ۲۲۳، ۶۶۲ | همدم ۴۱۸، ۶۵۵ |
| یکتواخت کردن ۵۰۶، ۶۵۸ | همدم سازی ۵۰۵ |

تصویر ابو عبد الرحمن الکردی

مرکز نشر دانشگاه

www.iup.ir

ISBN:978-964-01-0618-1



9 789640 106181

انسان مهندسی و علم مواد



9 789640 106181

۶۳۰۰ تومان